

令和 2 年度 修 士 論 文

加振パルスドップラレーダイメージングによる
劣化 RC 構造物の鉄筋振動変位分布評価

指導教員 三輪 空司 准教授

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻

電子情報・数理教育プログラム

T191D067 中村 和弘

目次

1 章 序論.....	5
1-1 研究背景	5
1-2 研究目的	6
2 章 原理.....	7
2-1 加振レーダの原理.....	7
2-2 位相補正	9
2-3 マイグレーションの原理.....	10
3 章 加振パルスドップラレーダ概要.....	12
3-1 計測システム概要.....	12
3-2 ブロックダイヤグラム.....	13
3-3 使用機器	15
3-4 出力特性	19
3-4 システムのノイズ評価.....	27
4 章 加振レーダスキャンシステムの性能評価	29
4-2 実験概要	29
4-2-1 使用供試体	29
4-2-2 計測機構	29
4-2-3 実験概要.....	31
4-3 計測結果	31
4-3-1 計測結果	31
4-3-2 既往のシステムとの比較	34
5 章 鉄筋腐食進展に伴う振動変位変化分布	37
5-1 電食におけるコンクリート中の鉄筋腐食原理	37
5-1-1 コンクリートの組成	37
5-1-2 鉄筋腐食原理	38

5-2	電食実験原理	39
5-3	実験概要	39
5-4	電食実験における鉄筋振動変位評価	40
5-4-1	イメージング結果	40
5-4-2	振動変位分布	48
5-4-3	鉄筋の腐食評価	48
5-4-4	振動変位評価	54
6 章	塩水腐食試験における供試体の振動変位評価	55
6-1	供試体概要	55
6-2	計測概要	56
6-3	計測結果	56
6-4	供試体腐食評価	66
7 章	振動変位の局所的な上昇の要因推定	69
7-1	電食供試体における直交方向イメージング	69
7-1-1	実験概要	69
7-1-2	実験結果	69
7-2	鉄筋腐食におけるコンクリート内部ひび割れや劣化	72
7-3	振動変位の局所の上昇のメカニズム考察	74
8 章	結論	76
8-1	結論	76
8-2	今後の課題	77
	参考文献	78
	謝辞	79
	研究業績	79
	査読付き論文	79
	口頭発表	79
	付録	80

爆轟供試体計測.....	80
より深いかぶりにおける計測.....	91

1 章 序論

1-1 研究背景

現在日本で使用されている社会インフラの多くは高度経済成長期に集中的に建造されたものである。これらの RC 構造物は建造から 60 年余りが経過し、次々と耐用年数を迎えているが、建て替えには巨額の費用を要するため、政府としては補修を行うことで引き続き使用していく方針となっている。この補修のため、コンクリート及び内部鉄筋の劣化箇所を調べる計測手法が必要とされている。現在主流である非破壊的な RC 構造物の劣化評価法として衝撃弾性波法や、超音波法、電磁パルス法といった弾性波を用いた手法が知られている。しかし、弾性波計測はコンクリート表面において、センサを接触させて計測を行うため、センサの接触状況の影響を受けやすい。また、弾性波の反射を利用する反射法では、ひび割れや空隙、鉄筋の反射波の情報が弾性波の伝搬経路に存在するひび割れに大きく影響を受ける可能性がある。そこで我々は微細なひび割れ等の伝搬路の劣化の影響を受けにくい電磁波に着目し、励磁コイルによりコンクリート中の鉄筋を 100 Hz 程度で正弦加振させ、ドップラレーダ法を用いて鉄筋振動変位を非破壊かつ定量的に計測する Fig. 1-1 に示すような加振レーダ法を提案してきた。

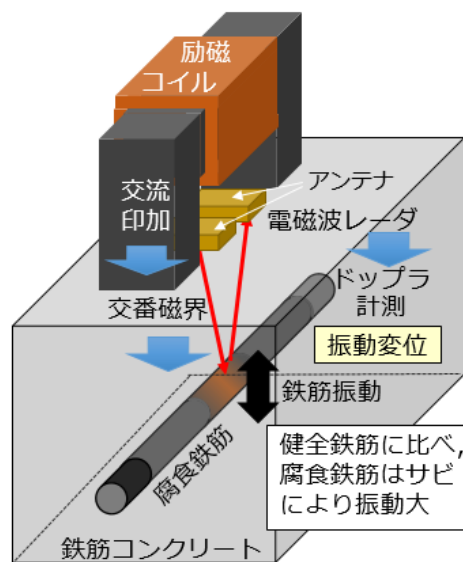


Fig. 1-1 加振レーダ概要

加振レーダ法は従来のレーダ波形に加え、振動物体にのみ感動を有する独立なレーダ波形にも取得可能であり、両波形の反射振幅比から鉄筋単体の振動変位を算出、移動計測での合成開口処理を行い、空間分解能を向上させ、不要反射波の影響を低減、鉄筋部位を高精度

に特定することができ、複雑な鉄筋コンクリート供試体において振動変位推定が可能である。

一方で、既往の加振レーダ装置はネットワークアナライザをベースとした周波数領域でのレーダ計測システムであり、外部で振動周波数分だけ変調させることでドップラ成分の計測を行っている。しかし、50 Hz 程度のドップラ変調成分のみをネットワークアナライザを用いて計測するには、ドップラ周波数よりもはるかに小さい IF 周波数帯域幅を用いる必要があり、IF 低域幅の低下によりドップラ成分 1 点の計測時間が 120 秒と極めて長い。したがって、レーダをスキャンしながら数十点の計測を行い、イメージングを行うには合計で 1 時間程度を要することが大きな問題点であった。また、システム内部で発生する非定常な信号がレーダ信号に重畳し、ノイズ源となり振動変位の評価制度の劣化要因ともなっており、計測時間を長くしても SN 比を向上できない等、これらの問題の改善が必要とされていた。

1-2 研究目的

本研究では、連続波をベースとしたネットワークアナライザに代わり、インパルス状の波を用いた加振レーダ専用のパルスドップラレーダを開発し、従来のシステムに比べ、計測時間を飛躍的に向上させることをめざす。また、開発した加振パルスドップラレーダの高速性を利用し、従来、鉄筋軸と直交する方向に多点計測しイメージングベースの振動変位推定を行っていたが、これを鉄筋軸方向にスキャンすることで、鉄筋振動変位の空間分布から鉄筋腐食の空間分布推定を行った結果について述べる。さらに、その振動変位増加の原因について考察する。

まず、2 章にて今回新たに開発した加振パルスドップラレーダシステムの原理並びにイメージングベースの振動変位推定の原理について述べる。

3 章では、開発したパルスレーダシステムについて詳述する。

4 章では、同一供試体での既往のレーダシステムと新規に製作したパルスレーダを用いて、計測並びにイメージングを行った結果について述べる。

5 章では、開発したパルスレーダを使用して、電食を行った供試体の積算電流毎の振動変位計測を行い、積算電流の上昇に伴う腐食や振動変位の分布についての考察について述べる。

6 章では、自然な腐食を模擬した梁型供試体に対し、本手法を適用し、電食実験との比較を行った結果について述べる。

7 章では、振動変位が局所的に上昇する原因についてイメージングを用いた計測を用いて検証を行った結果について述べる。

2 章 原理

本章では，加振パルスドップラレーダの基本的な原理について述べる．

2-1 加振レーダの原理

本項では，パルスドップラレーダシステムの原理について述べる．

Fig. 2-1 に加振パルスレーダ法におけるドップラ成分計測の概要図を示す．

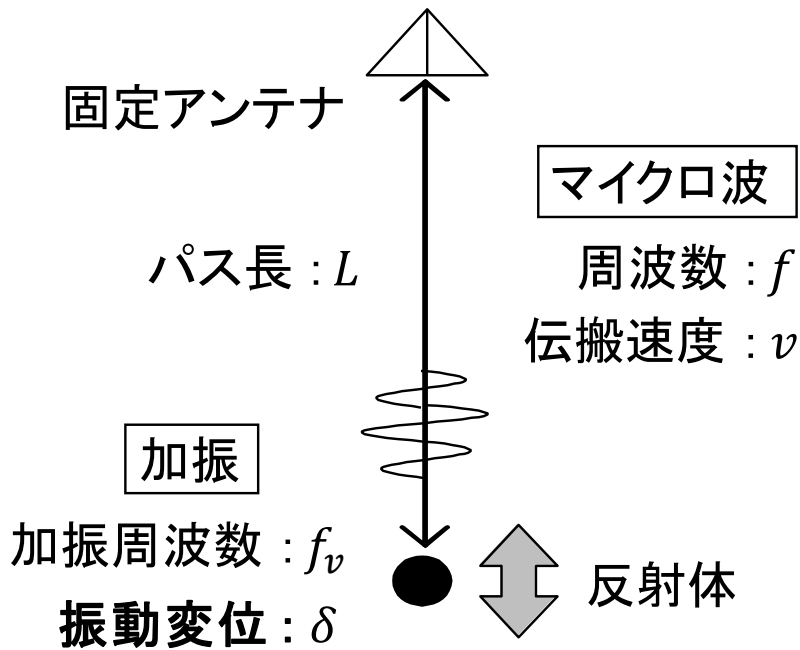


Fig. 2-1 加振パルスレーダのドップラ成分計測の概念図

加振レーダ法がレーダ波形の取得に単一周波数の連続波を用いることにに対し，加振パルスレーダでは，連続波の代わりにパルス波を用いることが最大の相違点である．

パルスレーダにおけるパルス波形として， $t=0$ でピーク値 1 を持つ任意の単峰性孤立波 $e(t)$ を中心周波数 f_c の複素正弦波で変調した複素変調パルス波 $\dot{p}(t)$ を考える．

$$\dot{p}(t) = e^{j2\pi f_c t} e(t) \quad (2-1)$$

今，送信点から距離 L 離れた反射体に向けパルス波を照射し，反射体からの反射波を同一地点で受信する．このとき，複素受信レーダ波形 $\dot{h}(t)$ は反射係数を R ，電磁波の伝搬速度を v として式(2-2)のように表される．

$$\dot{h}(t) = R\dot{p}\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (2-2)$$

$\dot{h}(t)$ の実部は通常のレーダ波形，虚部は実部のヒルベルト変換に対応している．さらに，反

射体を単一周波数 f_v , 振動振幅 δ で電磁波の伝搬方向に振動させると, 振動により反射波の伝搬距離が変化するため, 距離の時間変動を $L(t)$ とすると式(2-3)のように表される. この時, 任意の計測地点 x_n において変化する加振信号の位相を θ_n とする.

$$L(t) = L - \delta \cos(2\pi f_v t + \theta_n) \quad (2-3)$$

レーダ波形の変動は GHz オーダーであるのに対し, f_v は 1 kHz 以下であり, $L(t)$ の変化速度は極めて遅い. 繰り返し時間 T 毎に対しレーダ波形は瞬時に得られるため, レーダ波形の遅延時間 t とその取得時間 T は独立とみなせる. ここで, レーダ波形を繰り返し毎に並べ変えた 2 次元の複素レーダプロファイル $\dot{h}(t, T)$ を考えると, 式(2-4)のように表される.

$$\dot{h}(t, T) = R\dot{p}\left(t - 2\frac{L - \delta \cos(2\pi f_v T + \theta_n)}{v}\right) \quad (2-4)$$

ここで $\dot{p}(t)$, $\dot{h}(t)$ の時間 t に対するフーリエ変換をそれぞれ $\dot{P}(f)$, $\dot{H}_0(f) = R\dot{P}(f)e^{-j4\pi f L/v}$ とすると, $\dot{h}(t, T)$ のフーリエ変換 $\dot{H}(f, T)$ は式(2-5)のように表される.

$$\dot{H}(f, T) = \dot{H}_0(f)e^{j\frac{4\pi f \delta}{v} \cos(2\pi f_v T + \theta_n)} \quad (2-5)$$

加振レーダ法と同様, 電磁波の波長 $\lambda = v/f$ に対し, 振動変位 δ は極めて小さいため $f\delta/v \ll 1$ より, 式(2-5)を 1 次近似すると式(2-6)が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{H}(f, T) &\cong \dot{H}_0(f)\{1 + j4\pi f \delta \cos(2\pi f_v T + \theta_n)/v\} \\ &\cong \dot{H}_0(f)\left\{1 + j\frac{4\pi f \delta}{v}(e^{j(2\pi f_v T + \theta_n)} + e^{-j(2\pi f_v T + \theta_n)})\right\} \end{aligned} \quad (2-6)$$

ここで, $\dot{H}(f, T)$ は時間変動のない項と振動周波数 f_v で正弦変化する項に分離している. 式(2-6)を計測時間 T 方向にフーリエ変換すれば直流成分 $\dot{H}_0(f)$ と振動周波数 f_v での成分 $\dot{H}_D(f)$ が抽出される. 従来のネットワークアナライザで計測される無変調成分は $\dot{H}_0(f)$, ドップラ成分は $\dot{H}_D(f)$ であり無変調成分を用いて式(2-7)のように表される.

$$\dot{H}_D(f) = j2\pi f \dot{H}_0(f) \frac{\delta}{v} e^{j\theta_n} \quad (2-7)$$

$\dot{H}_0(f)$, $\dot{H}_D(f)$ を周波数 f に対して逆フーリエ変換すれば, 任意の計測地点 x_n における無変調成分, ドップラ成分の複素レーダ波形 $\dot{h}_0(t, x_n)$, $\dot{h}_D(t, x_n)$ がそれぞれ以下のように独立に得られる.

$$\dot{h}_0(t, x_n) = R\dot{p}\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (2-8)$$

$$\dot{h}_D(t, x_n) = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{h}_0(t) e^{j\theta_n} \quad (2-9)$$

したがって, 距離 L にある振動する反射体の振動変位 δ は無変調成分の時間微分波形とドップラ成分波形を用いて式(2-10)のように表される.

$$\delta = v |\dot{h}_D(2L/v)| / \left| \frac{d}{dt} \dot{h}_0(2L/v) \right| \quad (2-10)$$

加振中に得られたレーダ波形を繰り返し毎に並べ変えることでレーダプロファイル $\dot{h}(t, T)$ が得られる. さらにヒルベルト変換により複素レーダ波形 $\dot{h}(t, T)$ を求める. ヒルベルト変換はレーダ波形をフーリエ変換し, 負の周波数成分を 0, 正の周波数成分を 2 倍した後, 逆フーリエ変換することで取得でき, レーダ波形から容易に計算できる. その後 $\dot{h}(t, T)$ を T 方向にフーリエ変換して, 無変調成分波形 $\dot{h}_0(t, x_n)$ とドップラ周波数成分波形 $\dot{h}_D(t, x_n)$ を抽出し, 無変調成分波形を微分して式(2-10)に代入することで, 反射体の振動変位を得ることができる. Fig. 2-2 に振動変位算出の簡単な流れを示す.

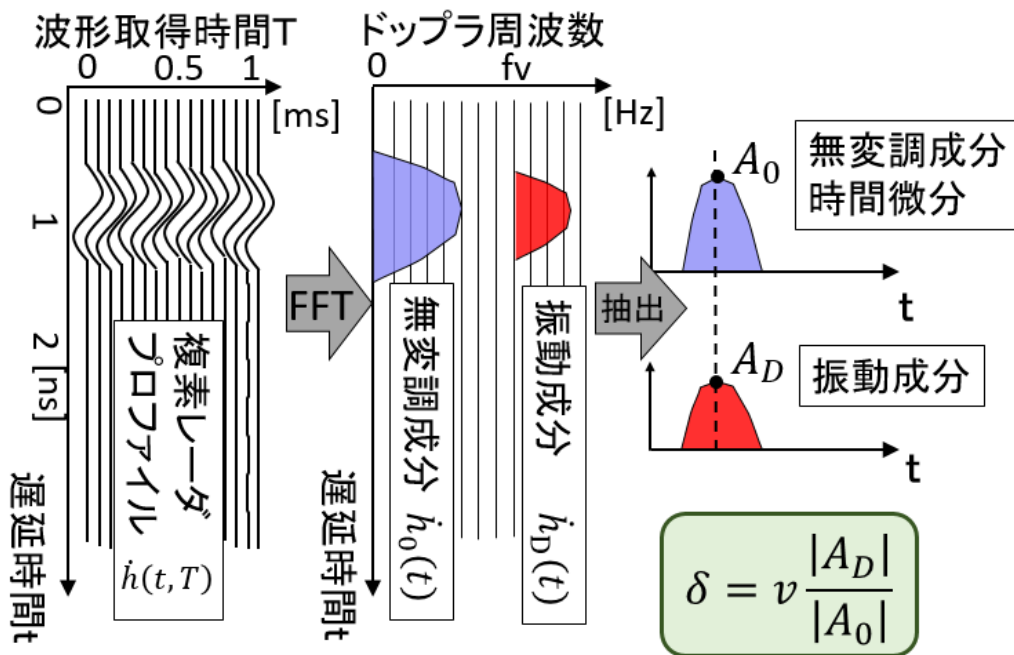


Fig. 2-2 振動変位算出方法

2-2 位相補正

連続して計測を行う場合, 加振信号と取得波形の同期について考える必要がある. 既往のネットワークアナライザを使用したシステムでは, 1 点 1 点で加振を区切り計測をしていたため, 計測波形と加振信号の同期がとれた計測であった. 一方, 新規システムでは移動中も加振を続けるため, 各計測点において加振信号と計測波形の同期がとれていない. このため, 移動計測後, 各波形について位相補正を行う.

加振パルスドップラレーダシステムでは, レーダ波形と同時に加振信号も取得する. 取得した加振信号をフーリエ変換し, 実際の加振周波数成分のみを抽出して用いる. 抽出した加

振成分の式を以下に示す．この時，加振信号の振幅を r ，加振周波数を f_v ，任意の計測地点 x_n において変化する初期位相を θ_n とした正弦波として以下に表す．

$$\begin{aligned} Z(t) &= r \cos(2\pi f_v t + \theta_n) \\ &= \frac{r}{2} (e^{j(2\pi f_v t + \theta_n)} + e^{-j(2\pi f_v t + \theta_n)}) \end{aligned} \quad (2-11)$$

式(2-11)を前項での原理と同様に時間 t でフーリエ変換を行った後，加振成分 f_v のみを抽出し，逆フーリエ変換したものを式(2-12)に示す．

$$Z(t) = 2\pi r e^{j\theta_n} \quad (2-12)$$

加振成分 $Z(t)$ から位相成分のみを抽出するため， $Z(t)$ を絶対値で割ることで振動成分を取り除き大きさ 1 の位相成分のみを抽出する．これを式(2-13)に示す．

$$P(T) = \frac{Z(t)}{|Z(t)|} = e^{j\theta_n} \quad (2-13)$$

式(2-9)の x_n におけるドップラ成分を抽出した位相成分で割ることで位相成分を取り除いたドップラ成分 $h'_{Dx_n}(t)$ を式(2-14)に示す．

$$h'_{Dx_n}(t) = \frac{h_{Dx_n}(t)}{P(T)} = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{h}_0(t) \quad (2-14)$$

これにより，非同期での加振における計測結果の位相補正が可能である．

2-3 マイグレーションの原理

一般に RC レーダでは孤立した物体の直上を移動しながら取得した波形を取得位置順に並べたレーダプロフィールは Fig. 2-3 のようになる．

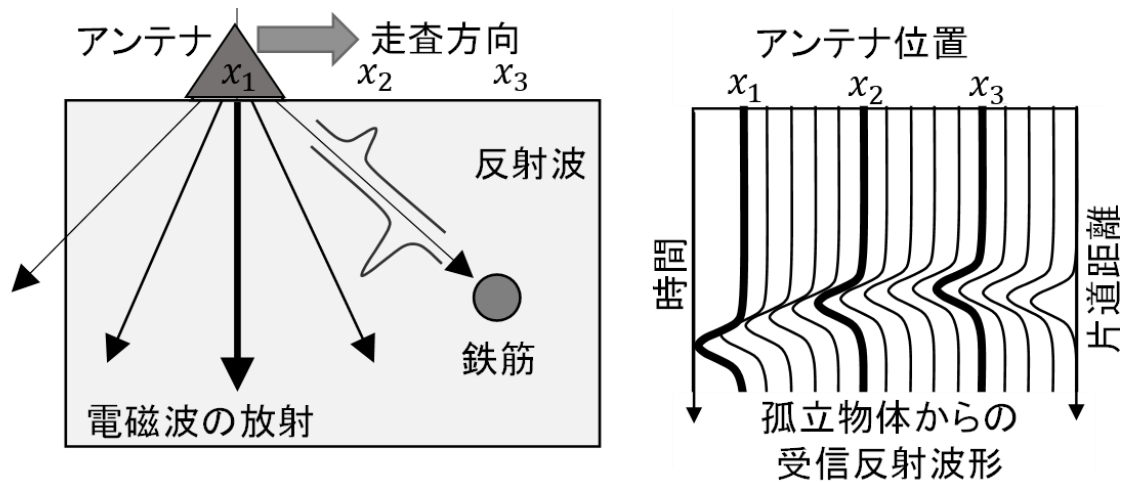


Fig. 2-3 計測波形のレーダプロフィール

Fig. 2-3 より，反射波の到達時刻は放射線状のプロファイルを示すが，スキャン方向の空

間分解能は悪い．そこで本報告では時間シフトしたレーダ波形を重ね合わせるキルヒホッフマイグレーション法と呼ぶ合成開口処理を用いる．送受信一体型レーダ波形の時間軸は、 $\frac{v}{2}$ を乗じてアンテナから反射体までの距離 l の関数とみなせる．このとき、ある距離 l に現れる波は、アンテナを中心とする半径 l の球面上の任意の点から到来したことを示す．その波源位置を推定するため、仮想波源 (x, z) を過程すると、 n 番目のアンテナ位置を x_n とした場合、座標 $(x_n, 0)$ から仮想波源までの距離 R は式(2-15)で表される．

$$R(x_n, x, z) = \sqrt{(x_n - x)^2 + z^2} \quad (2-15)$$

光速を c 、比誘電率を ϵ_r とすれば、媒質の伝搬速度は $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ であり、アンテナ位置 $(x_n, 0)$ で得られた受信波形を $g(x_n, t)$ と表記すると、ある仮想波源 (x, z) から各アンテナ位置に到来した波の振幅は $g(x_n, 2R/v)$ と表せる．従って、Fig.4-2 のようにアンテナ位置を中心に距離 R の同心円状に波形振幅 $g(x_n, 2R/v)$ を分布させ、全てのアンテナ位置についてこの操作を足し合わせることで、真の反射点では同一位相の波が足し合わされ評価関数値は増大する．一方で、それ以外の場所においては位相がランダムに足し合わされるため評価関数値は低い値を維持する．無変調成分とドップラ成分に対応したイメージング画像 $\dot{u}_0(x, z)$ 、 $\dot{u}_+(x, z)$ は式(2-16)、(2-17)で表される．

$$\dot{u}_0(x, z) = \sum_{n=1}^N \frac{d}{dt} g_0(x_n, 2R(x_n, x, z)/v) \quad (2-16)$$

$$\dot{u}_+(x, z) = \sum_{n=1}^N g_+(x_n, 2R(x_n, x, z)/v) \quad (2-17)$$

本処理は反射波の振幅情報も保存されていることから、真の反射体位置 (x_r, z_r) での鉄筋の反射振幅を用いて、式(2-18)により鉄筋の振動変位が得られる．これが、イメージングベースの鉄筋振動変位推定アルゴリズムである．

$$\delta(x_r, z_r) = v |\dot{u}_+(x_r, z_r) / \dot{u}_0(x_r, z_r)| \quad (2-18)$$

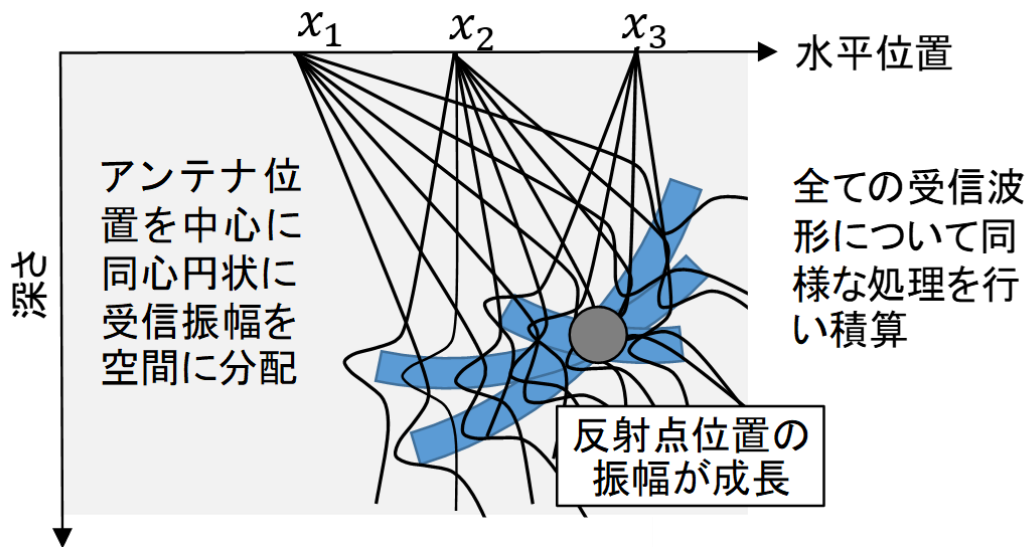


Fig. 2-4 マイグレーション処理

3 章 加振パルスドップラレーダ概要

本章では，製作した加振パルスドップラレーダのシステムについて述べる．

3-1 計測システム概要

通常レーダシステムでは，取得波形のサンプリングを行う際，標本化定理に則り，取得波形の 2 倍以上のサンプリング周波数を設定する．しかし，GHz 帯の高周波信号を直接サンプリングする方式は高コストであり，一般的には，S/N 比が低下することと引き換えに，等価サンプリング方式を使用する．Fig. 3-1 に等価サンプリング方式の概念図を示す．

まず，高周波信号であるパルス波の周期を T とした時，パルス波から δT だけ周期をずらした周期 $T + \delta T$ のパルス波を生成する．この周期がずれたパルス波とレーダの受信パルスのミキシングを行うと，周期 T の受信パルスに対し， δT だけずれた 1 点をサンプリングできる．2 回目のパルスでは $2\delta T$ の値がサンプリングされ， n 回目のパルスでは $n\delta T$ の値がサンプリングされる． δT の値を極めて小さく設定することで，高周波信号が多数のパルスで等価的にサンプリングできる．等価サンプリングの周期を $T + \delta T$ とした場合， $n(=T/\delta T)$ のパルス波で T 秒のレーダ波形をサンプリングすることができる．この時取得したレーダ波形は時間が n 倍に引き伸ばされる．例えば， $n=100000$ とした場合，GHz 帯の信号を kHz 帯の低周波信号として扱うことができ，通常のシステムでも容易にサンプリングが可能となる．

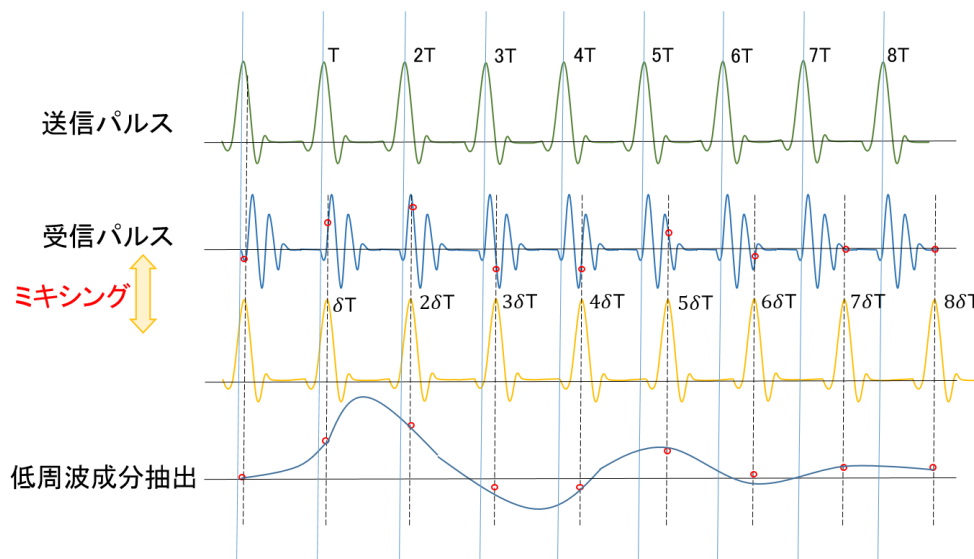


Fig. 3-1 等価サンプリング概念図

レーダシステムにおいて、空間的なエイリアシングを防ぐため、パルスの繰り返し周期を実験環境にて計測される不要反射波のうち、最も遅い到達時刻よりも長く設定する必要がある。製作したパルスレーダシステムでは、計測対象を損失性媒質であるコンクリート内部(伝搬速度 10 cm/ns)としているため、5 ns(200 MHz)を繰り返し周期と設定した。

送信パルスの繰り返し周波数を 200 MHz($T=5\text{ns}$)、等価サンプリングに用いる繰り返し周波数を 199.999 MHz、繰り返し周波数差を 1 kHz($\delta T = 25\text{fs}$)とした。したがって、 $n=200000$ となり、1 つ 5 ns のパルス波を 200000 パルスで生成するため、 $5\text{ ns} \times 200000 = 1\text{ ms}$ となり、5 ns 周期のレーダ波形を繰り返し周波数差の逆数の 1 ms 周期の低周波信号として扱うことができる。

3-2 ブロックダイアグラム

加振パルスドップラレーダシステムのブロックダイアグラムを Fig. 3-2 に示す。また、本システムによる計測の流れについて以下に示す。

1. クロックジェネレータから送信パルスである 200 MHz の矩形波と、等価サンプリングに用いる 1 kHz の周波数差を持った 199.999 MHz の矩形波の 2 種類を出力する。このとき、A/D コンバータでのサンプリングに用いる 1 kHz と 4 MHz の矩形波も同時に出力する。
2. 生成した 200 MHz と 199.999 MHz の矩形波を 2 つのパルスジェネレータへ入力し、同一周波数で繰り返すパルス波を得る。
3. 200 MHz のパルス波は増幅器で増幅された後、送信側のアンテナからセンシング波として出力される。出力されたパルス波は励磁コイルによって加振周波数 f_v で加振された計測対象によって反射し、ドップラ効果を受けて受信される。励磁コイルによって磁性体を加振する場合、励磁コイルに印加される電圧の 2 倍の周波数で加振されるため、加振周波数を設定するファンクションジェネレータでは目標とする加振周波数の 1/2 の周波数を出力することに留意する。
4. 3. で得られた受信波形と 2. で生成した 199.999 MHz のパルス波をミキサで掛け合わせることで受信信号を周波数差 1 kHz 分ずつサンプリングし、5 ns の波形を 1 ms へと引き伸ばす形で再現する。
5. 1 ms に引き伸ばされた信号をクロックジェネレータにて生成したサンプリング周波数で A/D コンバータにて取得する。A/D コンバータではサンプリング周波数をデジタル入力する際、周波数が 1/32 されるため、クロックジェネレータから 4 MHz を入力した場合、サンプリング周波数は 125 kHz となる。したがって、1 波形 125 ポイントでサンプリングを行う形となる。

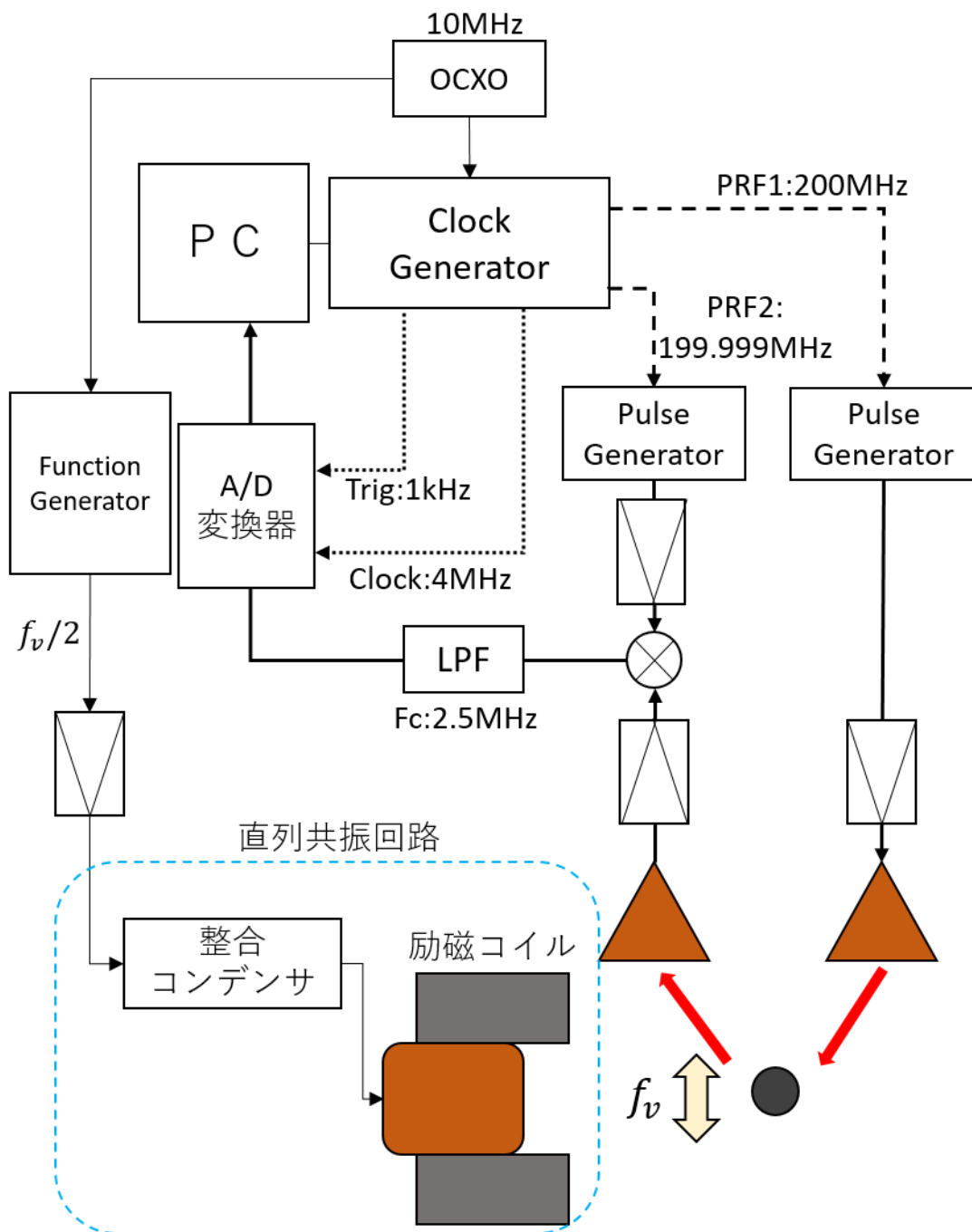


Fig. 3-2 加振パルスドップラレーダのブロックダイヤグラム

3-3 使用機器

システムの製作に使用した機器を Table 3-1 に，計測に使用した機器を Table 3-2 に示す．

Table 3-1 システム使用機器

名称	メーカー名	型番
Clock Generator	Silicon labs	Si5340-D-EB
Pulse Generator	Alnair Labs	EPG-210M
OCXO	Oscillo quartz	8788
Power Amplifier 1	Mini-circuit	ZVA-183-s
Power Amplifier 2	Mini-circuit	ZX60-83LN12+
Current Feedback Amplifier	Texas Instrument	THS300 1 EVM

Table 3-2 計測使用機器

名称	メーカー名	型番	設定
Multi-Function Generator	NF 回路設計 ブロック	WF1973	周波数:53Hz 出力電圧:1~3V
AC/DC Power Source	NF 回路設計 ブロック	EC1000SA	AC-EXT
DC Power Supply	GwINSTEK	GPS-4303	出力電圧:24V
XA actuator	SUS	XA-50H-600	
A/D コンバータ	タートル工業	TUSB-0224ADM	外部クロック 外部トリガ

計測に使用しているボウタイスロットアンテナは厚さ 0.3 mm の銅板とセミリジットケーブルを用いて作成した．ボウタイスロットアンテナの寸法の概念図を Fig. 3-3 に，実際に作成したボウタイスロットアンテナを Fig. 3-4 に示す．また，空気中で取得した周波数特性を Fig. 3-5 に示す．

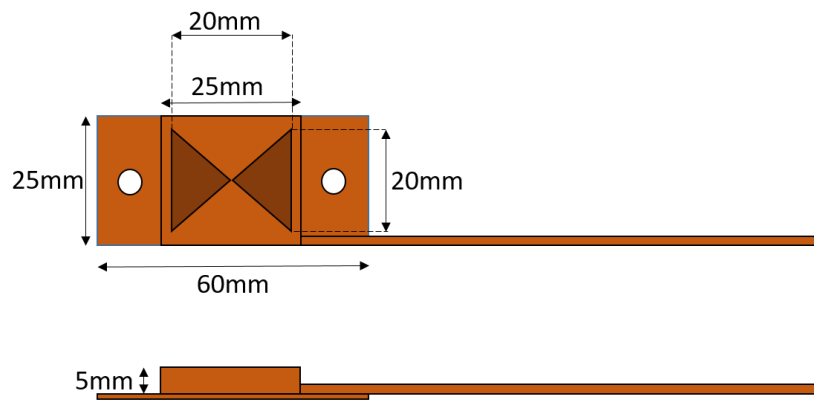


Fig. 3-3 ボウタイスロットアンテナ寸法



Fig. 3-4 ボウタイスロットアンテナ写真

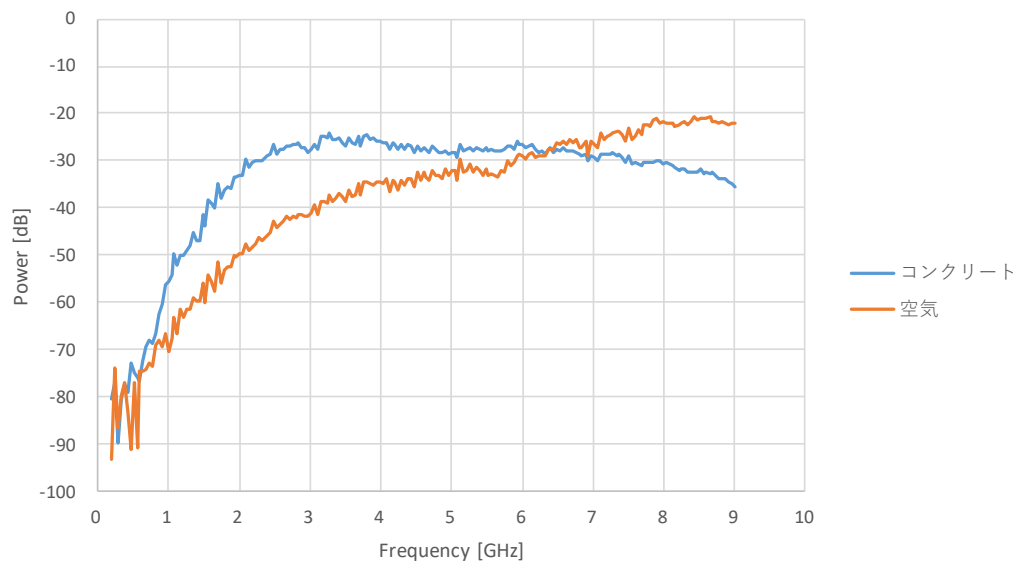


Fig. 3-5 ボウタイスロットアンテナ周波数特性

計測対象の鉄筋の加振に使用している励磁コイルもボウタイスロットアンテナと同様に作成している．励磁コイルとは，強磁性体である電磁鋼板でできた鉄心(以降コアと呼称する)などに励磁巻線を施し，交流電流をコイルに印加することで交番磁界を発生させ，鉄筋などの磁性体を磁気吸引力で加振するコイルを指す．コイルのコアには渦電流損低減のため，断面積 38×60 mm，横幅 205 mm のトロイダル形状の積層電磁鋼板を用いている．周囲に巻いたエナメル線は直径 1.3 mm のものを 750 巻きした．製作した励磁コイルはリアクタンス L : 173.7 mH，巻線抵抗 r : 4.8Ω であった，実際のコイルを Fig. 3-6 に示す．



Fig. 3-6 励磁コイル(750 巻)

次に，加振部分の整合コンデンサとコイルを含めた共振回路の回路図を Fig. 3-7 に示す．

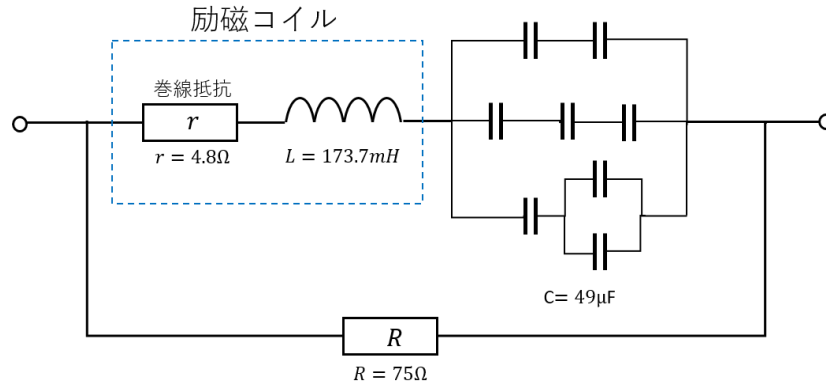


Fig. 3-7 整合コンデンサとコイルを含めた共振回路回路図

励磁コイルを含む共振回路部分は簡単な LC 直列共振回路となっている．回路と並列に 75Ω の抵抗が接続されているが，これは定電流源として動作するアンプが動作した際，インピーダンスが無限大となり，動作制限がかかることを防ぐためである．また，共振回路の共振周波数 f_r はコンデンサの合成容量を C 、コイルのインダクタンスを L とすると，式(3-1)によって求めることができる．

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-1)$$

式(3-1)より，共振周波数を算出すると 54.6 Hz となる．しかし，計測時は鉄筋の影響によりリアクタンスの値が前後するため，インピーダンスが最も低くなる 54 Hz 付近の周波数を使用する．

3-4 出力特性

製作したシステムを Fig. 3-8 に示す.

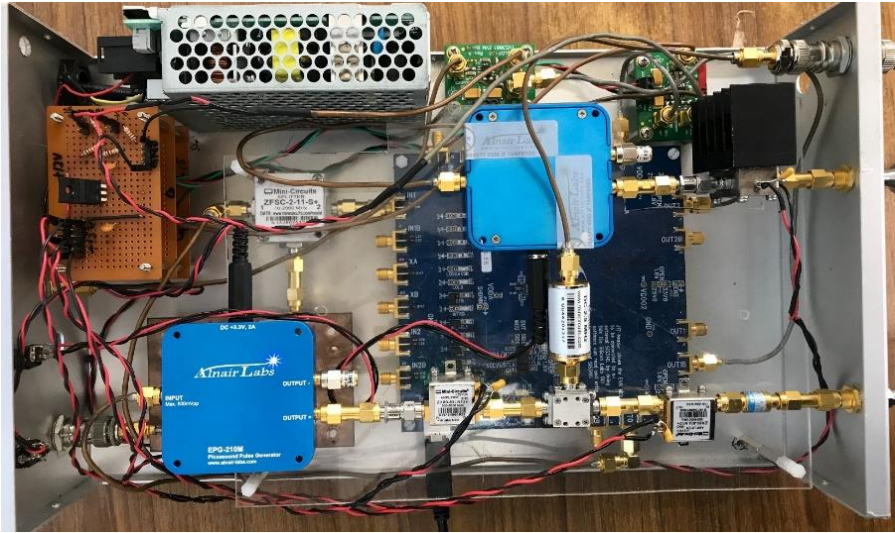


Fig. 3-8 加振パルスレーダシステム

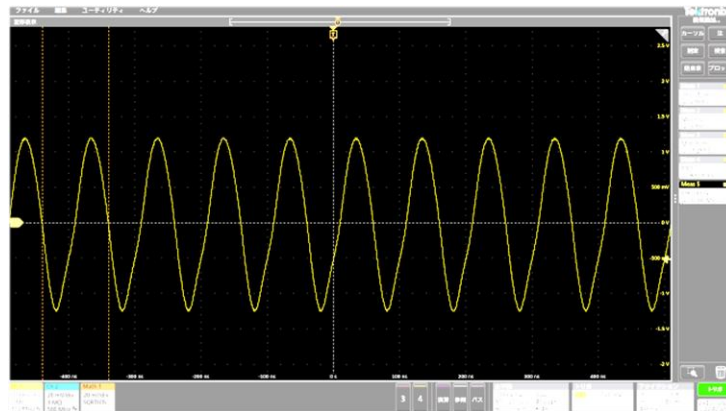
各部の出力波形を以下に示す.

[Clock Generator]

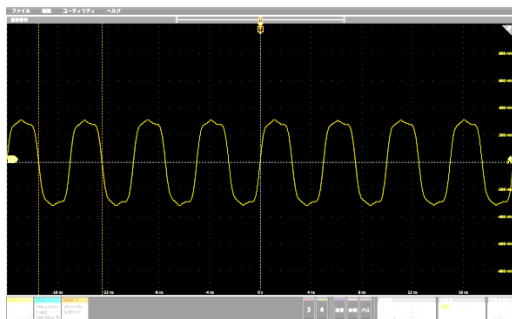
クロックジェネレータ Si5340-D-EB では, IN1~IN3 の入力 3 端子, OUT0~OUT3 の出力 4 端子があり, 各部入出力の対応を Table 3-3 に示す. 波形を Fig. 3-9(a)~(e)に示す.

Table 3-3 クロックジェネレータ出力値

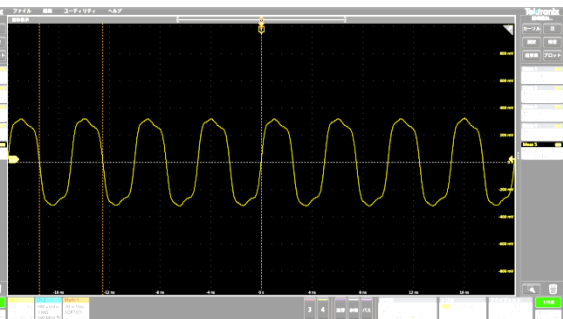
端子名	入出力先	設定値	振幅	図
IN1	OCXO	10MHz	2.401V	(a)
OUT0	PulseGenerator1	200MHz	567.7 mV	(b)
OUT1	PulseGenerator2	199.999MHz	624.6 mV	(c)
OUT2	A/D コンバータ	4MHz	759.6 mV	(d)
OUT3	A/D コンバータ	1kHz	769.6 mV	(e)



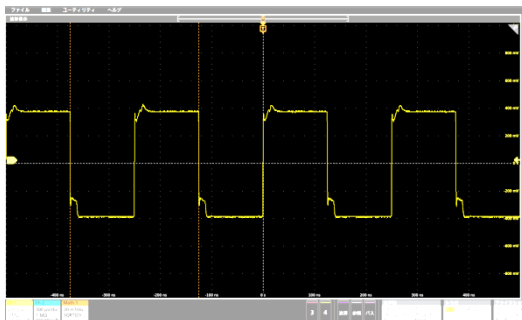
(a) 基準周波数(100ns/div)



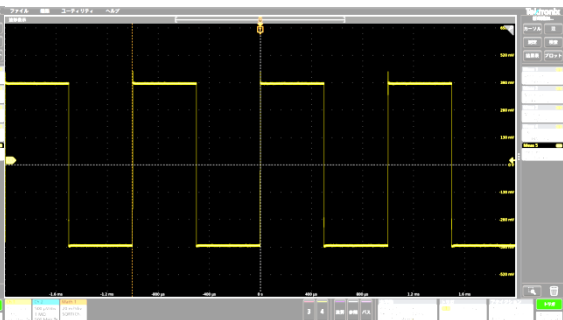
(b) 送信周波数(4ns/div)



(c) 相関周波数(4ns/div)



(d) クロック周波数(100ns/div)



(e) トリガ周波数(400μs/div)

Fig. 3-9 クロックジェネレータ入出力波形

クロックジェネレータの出力は正負の振幅 567~769 mV の矩形波となっており、高周波になるにつれ波形がなまり、振幅も低下している。

[Pulse Generator + Power Amplifier]

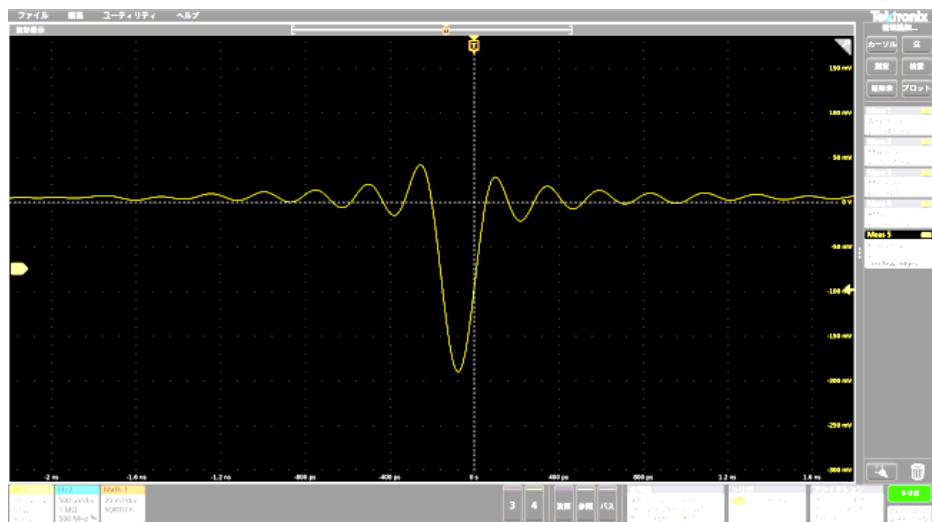
クロックジェネレータからパルスジェネレータへ、200 MHz の送信周波数、199.999 MHz の相関周波数の矩形波を入力した際の出力電圧値並びに、増幅器にて増幅させた電圧値を Table 3-4 に、波形をそれぞれ Fig. 3-10, Fig. 3-11 に示す。また、パルスジェネレータの出力スペクトルを Fig. 3-12, Fig. 3-13 に、各種値を Table 3-5 に示す。

Table 3-4 電圧値

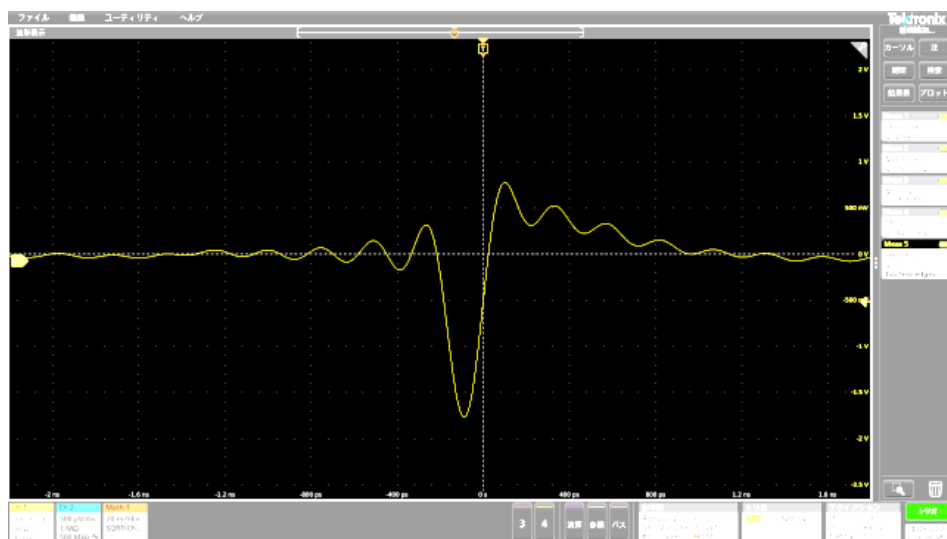
波形	振幅(mV)	最大値(mV)	最小値(mV)
送信パルス	234.8	42.2	-192.5
増幅後	2711	1020	-1691
相関パルス	233.0	191.4	-41.6
増幅後	2560	788.7	-1771

Table 3-5 スペクトル値

名称	値
帯域	9kHz~6.4GHz
表示幅	10dB/div, 0dB~-100dB
RBW	100kHz

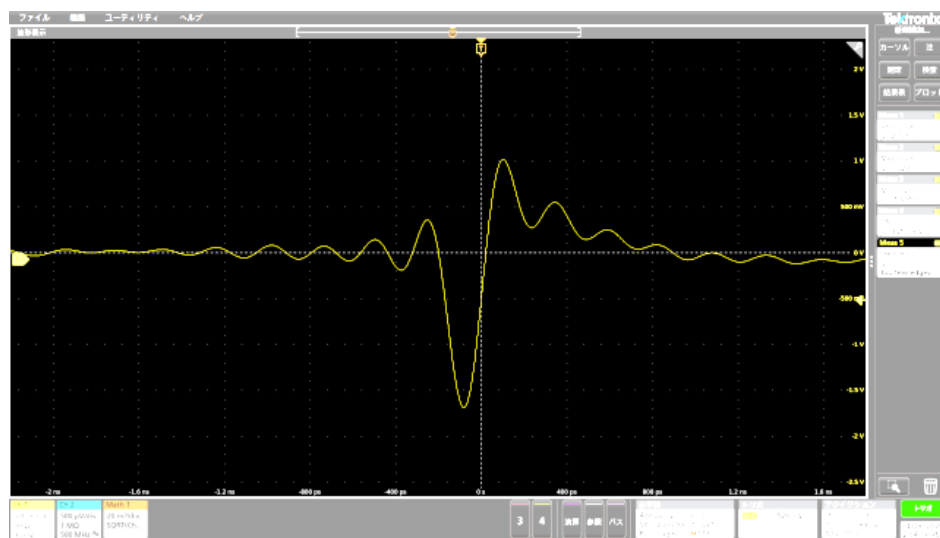


(a) 送信パルス波形(400ps/div)

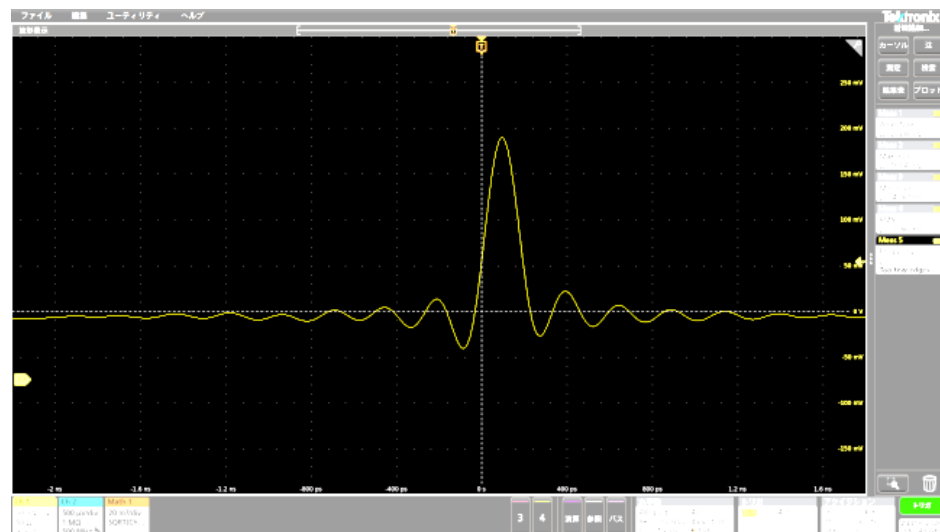


(b) 相関パルス波形(400ps/div)

Fig. 3-10 送信相関パルス



(a) 増幅後送信パルス波形 400ps(div)



(b) 増幅後相関パルス波形

Fig. 3-11 増幅後パルス(400ps/div)

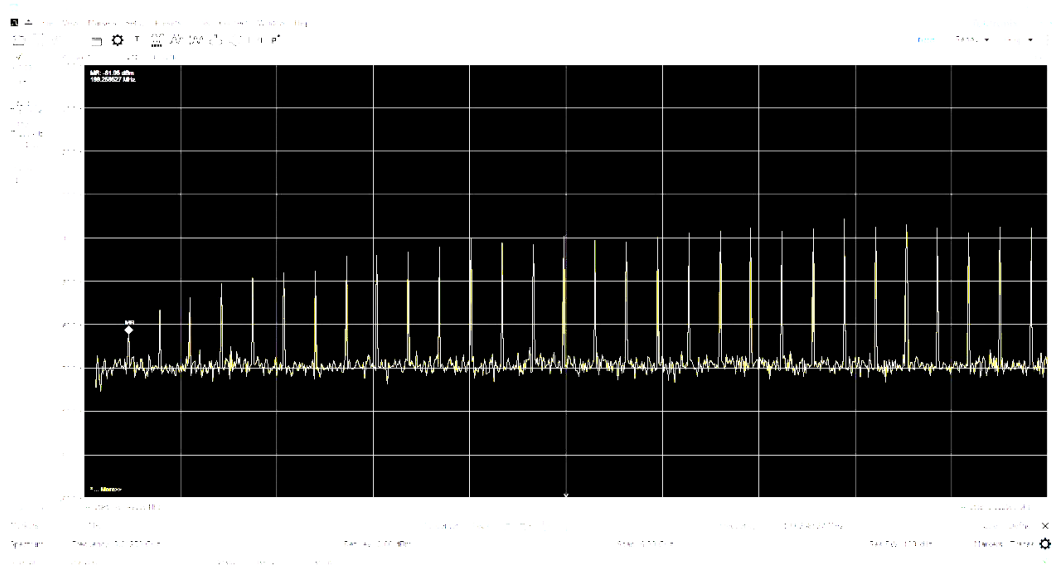


Fig. 3-12 送信パルススペクトル

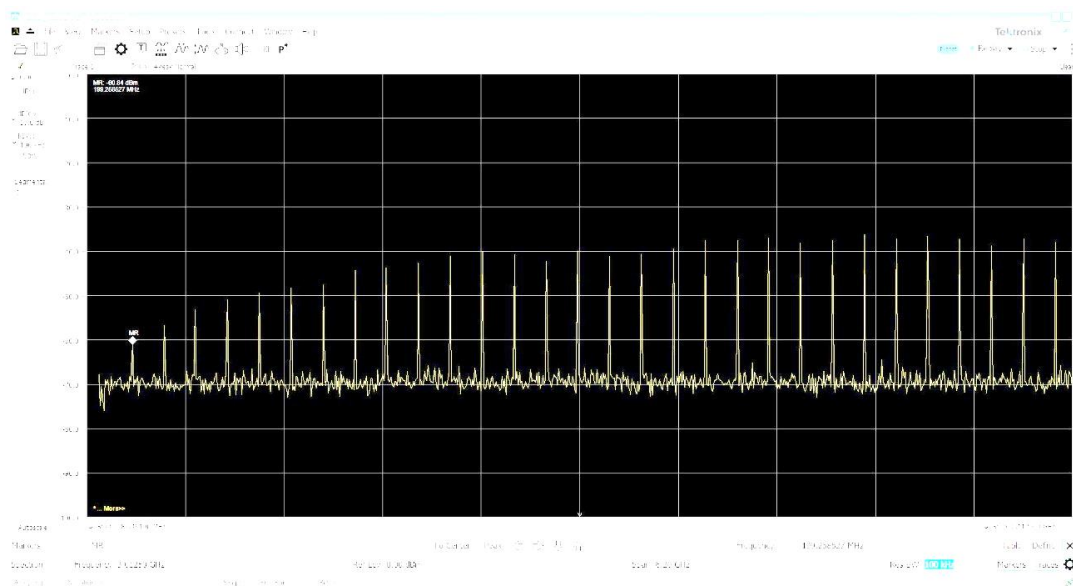


Fig. 3-13 相関パルススペクトル

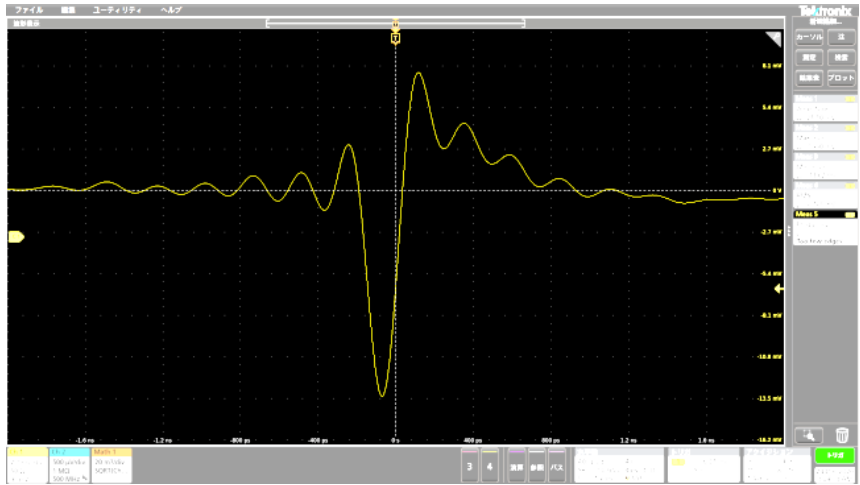
送信パルス側に使用している増幅器は ZVA-183-s でありデータシートでのゲインは 26 dB となっている。相関パルス側には ZX60-83LN12+を使用しゲインは 22 dB である。Table 3-5 より、送信パルスでは増幅前後で振幅がおおよそ 21.2 dB にあたる 11.5 倍、相関パルスではおおよそ 20.4 dB にあたる 10.5 倍となっており、概ねデータシート通りのゲインが得られていることが確認された。両方とも僅かに増幅率が減少しているが、この理由としては増幅器の帯域が考えられる。ZVA-183-s では 700 MHz~18 GHz、ZX60-83LN12+では 500 MHz~8 GHz であり、いくつかの低周波、高周波成分がカットされている可能性がある。

また、それぞれの増幅器においてサチュレーションを避けるため、増幅器の前に 3 dB のアッテネータを接続し、入力振幅を調整し、調整可能範囲において最大振幅が得られるようにしている。

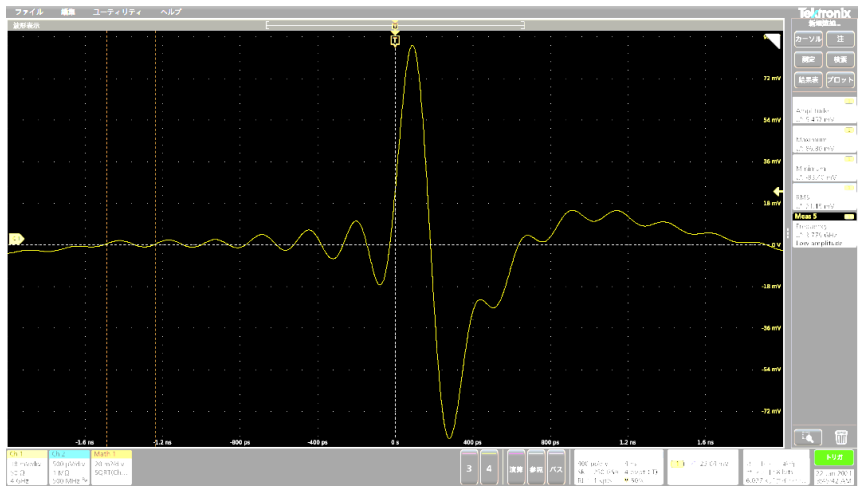
次に、パルスレーダの受信波形を Fig. 3-14(a)、受信波形を増幅させた際の電圧値を Table 3-5 に、波形を Fig. 3-14(b)に示す。この際、アンテナを 40 dB のアッテネータで代替している。

Table 3-5 パルスレーダ受信波形振幅

波形	振幅(mV)	最大値(mV)	最小値(mV)
受信波形	20.85	7.413	-13.43
増幅後	170.2	86.8	-83.4



(a) パルスレーダ受信波形



(b) 増幅後パルスレーダ受信波形

Fig. 3-14 パルスレーダ受信波形

[Mixer]

受信波形と相関パルスをミキサにてミキシングした後，等価サンプリングを行う．等価サンプリングを行った後の波形を Fig. 3-15，2.5 MHz のローパスファイルタを接続した後の最終的な出力の電圧値を Table 3-6 に，波形を Fig. 3-16 に示す．

Table 3-6 パルスレーダ出力波形振幅

波形	振幅(mV)	最大値(mV)	最小値(mV)
LPF 前波形	91.31	44.36	-46.94
出力波形	68.91	37.38	-31.53

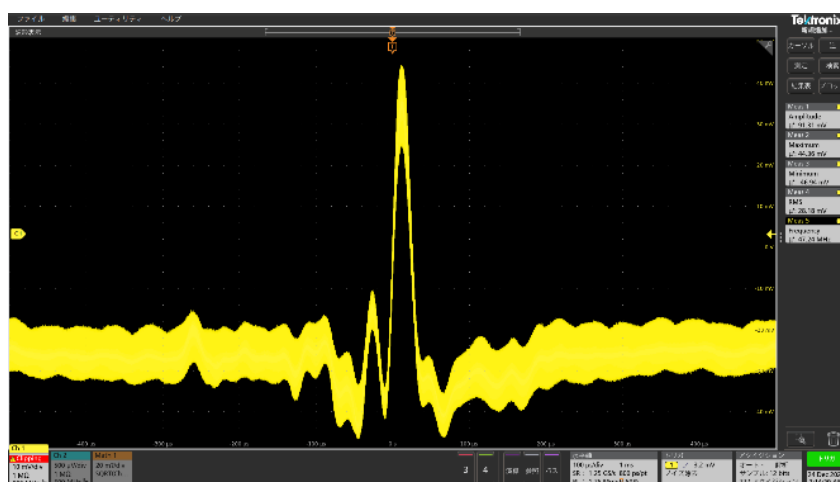


Fig. 3-15 等価サンプリング後の波形(100μs/div)

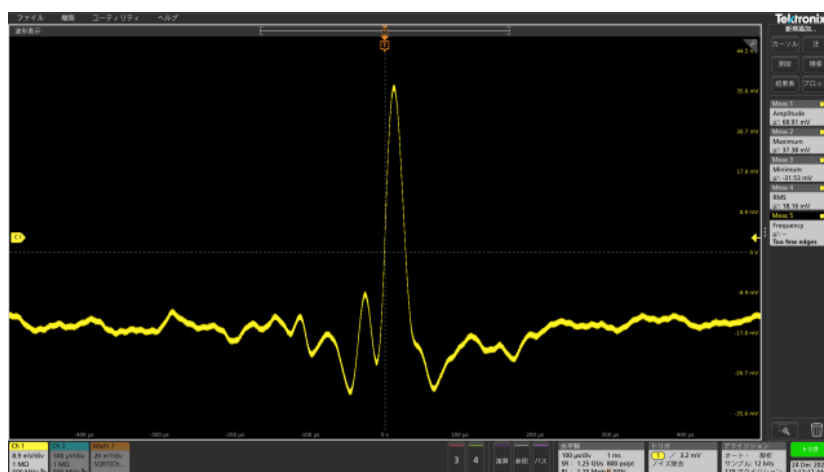


Fig. 3-16 出カインパルス応答波形(100μs/div)

3-4 システムのノイズ評価

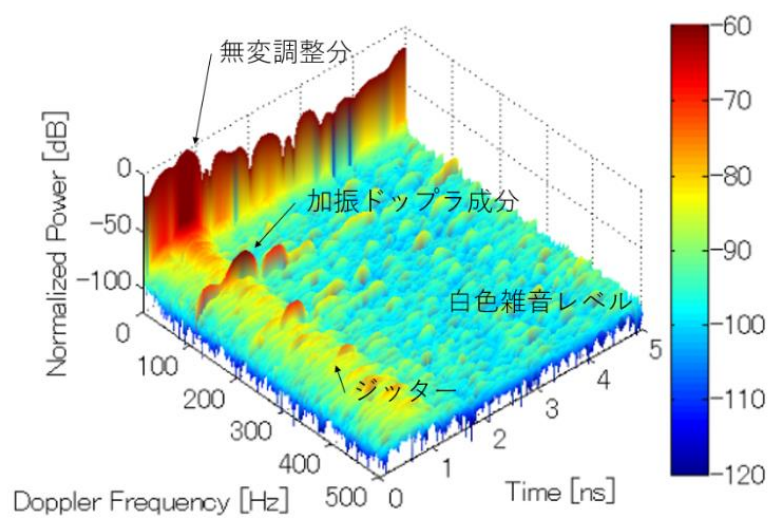
システムのノイズ評価のため、かぶり 30 mm の鉄筋コンクリート供試体を用いての計測を行った。加振周波数 53 Hz, 1 秒間で供試体中央部の計測により得られたレーダ波形、並びにスペクトルを Fig. 3-9 に示す。Fig. 3-9(a)は、1 ms 毎に計測されるレーダ波形を複素レーダ波形に変換し、フーリエ変換したドップラ成分のスペクトルを示している。0 Hz にみられる強い信号が無変調成分であり、53 Hz の 2 倍の周波数である 106 Hz 付近にみられる応答が加振ドップラ成分の信号となっており、無変調成分と比較し、-60 dB 程度の大きさとなっている。Fig. 3-9(b)にはこの時間波形を示しており、黒線が無変調成分のレーダ波形の包絡線、赤線が 106 Hz にみられるドップラ成分の包絡線である。この時、比誘電率を 11 とすると幾何学的配置により定まる鉄筋反射の到達時刻は 1 ns 程度であり、図のピーク位置と一致する。このピークが供試体の鉄筋位置であり、無変調成分、ドップラ成分共にピークが得られている。

Fig. 3-9(a)より、応答が見られない白色雑音にあたる部分のレベルは-100 dB 程度、ドップラ成分の応答がみられている時間において各周波数部分に出ているシステムのジッターのレベルは-80 dB となっている。ジッターは無変調のピーク部に比例しており、システムのダイナミックレンジは、無変調成分のピーク値に対し、ジッターレベルと白色雑音レベルの大きい方との幅で決まる。これより、加振パルスドップラレーダシステムでは 1 秒間での計測時において最大 80 dB 程度のダイナミックレンジを実現した。

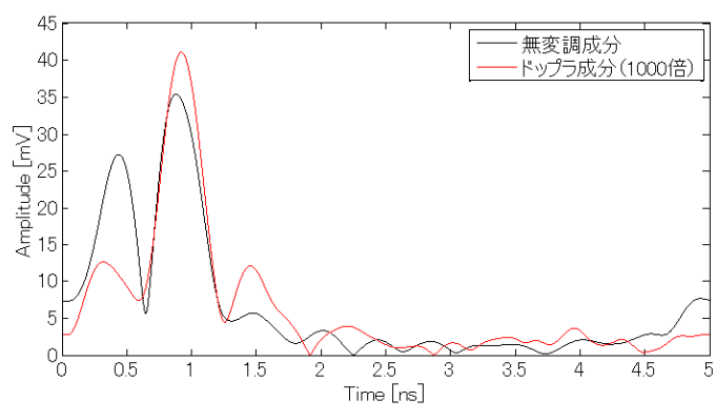
また、ノイズレベル評価のため、別の供試体の計測を行った。この時、パルスレーダの設定は同一の状態ですべて計測時間 10 秒として、計測波形を 1 秒ごとに同期加算した際のノイズ変化の確認を行った。

同期加算では、加算回数を n とした時にノイズは $1/\sqrt{n}$ で低減されることが知られている。同期加算無しの状態を基に算出した理論値と実際の計測値基に算出した値をプロットしたものを Fig. 3-10 に示す。

Fig. 3-10 より、計測時間の増加に伴い、ノイズレベル理論値通り $1/\sqrt{n}$ で低減されていることが確認されると同時に、計測時間を増加、又はデータ数を増やすことで S/N 比が向上することを示した。これより、計測対象物や目的により、計測時間を調整することでより柔軟な計測が可能であると考えられる。



(a) 加振レーダ信号のドップラスペクトル



(b) 加振レーダ波包絡線

Fig. 3-9 加振パルスレーダのレーダ波形

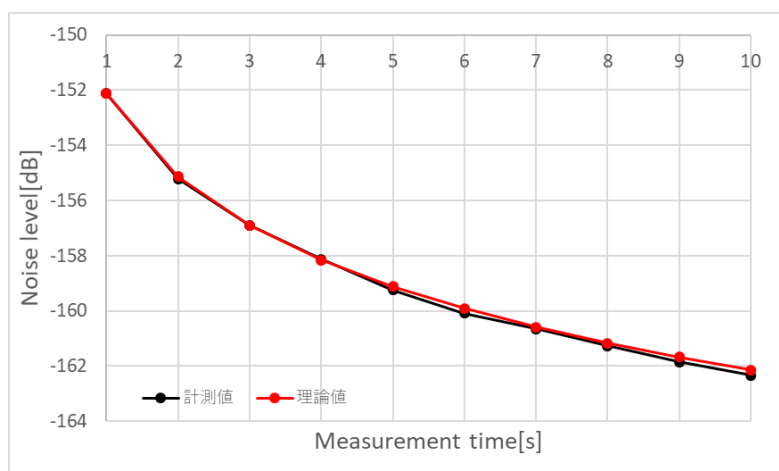


Fig. 3-10 ジッターをノイズフロアとしたときのノイズレベルの変化

4 章 加振レーダスキャンシステムの性能評価

本章では，ネットワークアナライザを用いたシステムと加振パルスドップラレーダシステムで同一の供試体の計測を行った際の結果に加え，既往のシステムと新規システムを比較した際の新規システムの有用性について述べる．

4-2 実験概要

4-2-1 使用供試体

実験に使用した供試体は，D13，D16，D19 の 3 種類の鉄筋がかぶり 30 mm の位置に埋設されている，W/C63%のものである．供試体の寸法を Fig. 4-1 に示す．

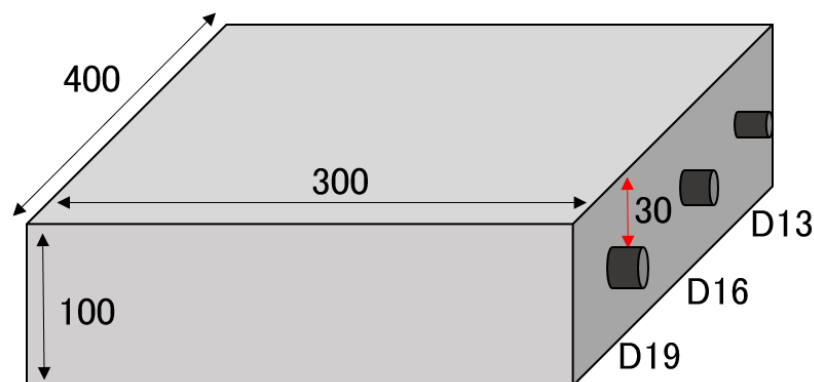
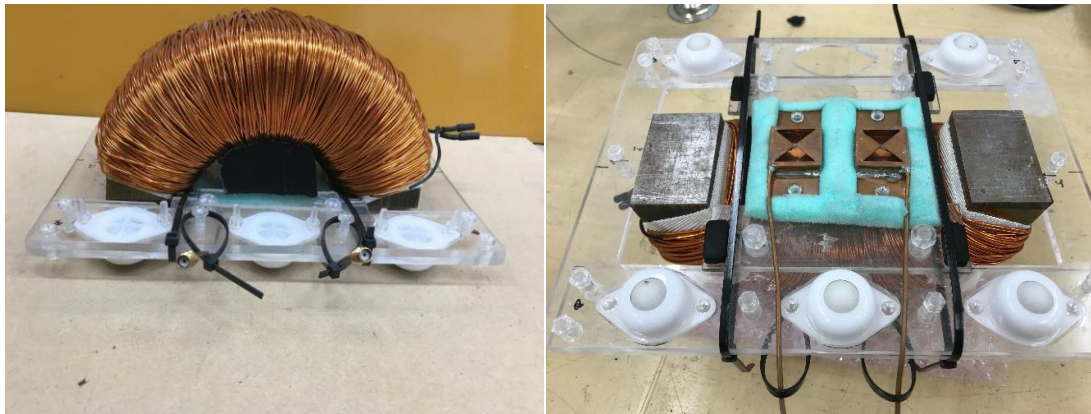


Fig. 4-1 3 鉄筋供試体寸法

4-2-2 計測機構

鉄筋の振動変位計測にあたり，マイグレーション処理を用いたイメージングを行うが，マイグレーション処理には，コイル及びアンテナを等間隔で移動させて計測を行う必要がある．このため，アンテナと励磁コイルをセットにした治具，並びにこれをアクチュエータ制御で移動させる移動機構の製作を行った．アンテナは給電点間隔 40 mm とし，供試体と接地させるため，固定治具との間に緩衝材として厚さ 10 mm のスポンジを挟んだ．また，不要反射波低減のため，励磁コイルとアンテナの間に厚さ 30 mm のスポンジを設置した．製作した治具を Fig. 4-2 に，移動機構を Fig. 4-3 に示す．



(a) 側面

(b) 裏面

Fig. 4-2 計測治具

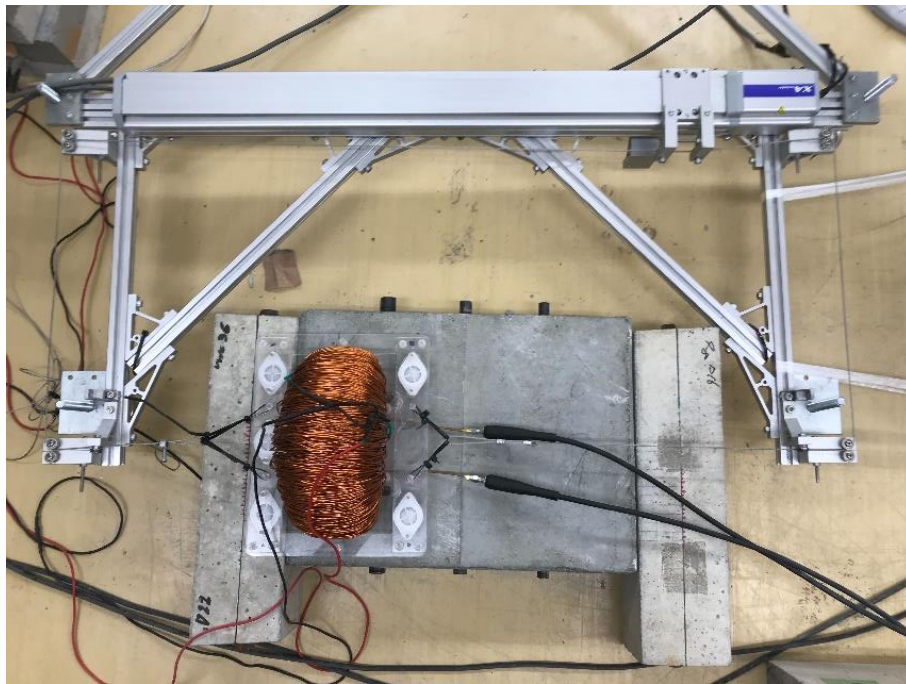


Fig. 4-3 リニアアクチュエータ制御による移動機構

4-2-3 実験概要

パルスレーダの設定並びに，計測条件を Table 4-1 に示す．

Table 4-1 パルスレーダ各種設定値

名称	設定値
Clock Generator	送信周波数：200MHz 相関周波数：199.999MHz トリガ周波数：1kHz クロック周波数：4MHz
A/D コンバータ	外部トリガモード サンプリング周波数：125kHz
Visual C++	計測時間：1 秒 計測間隔：3 秒 計測点数：61 点
アクチュエータ	計測間隔：5mm 計測区間：300mm

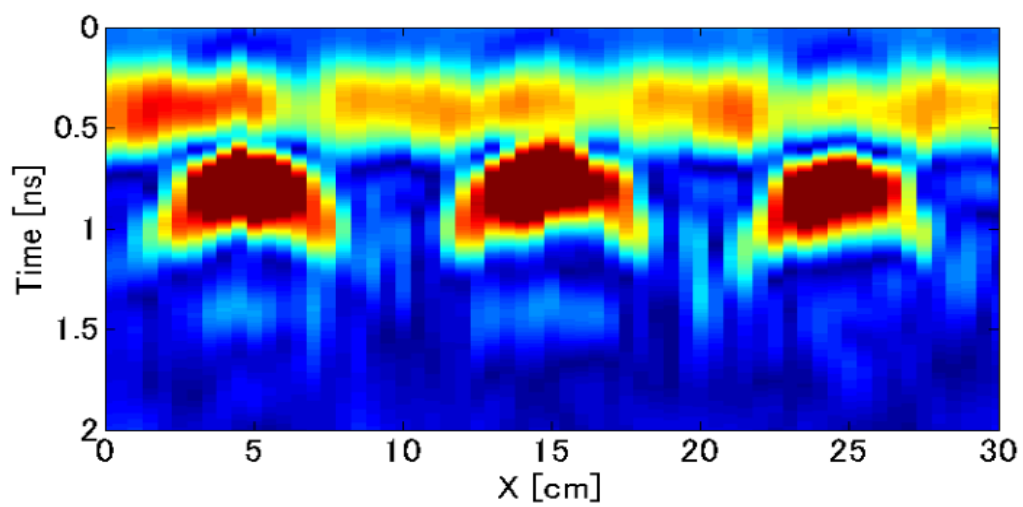
移動計測では，再現性向上のためアクチュエータ制御で移動を行った．計測区間 300 mm を 5 mm 間隔，計 61 点の計測とした．また，計測時間，計測間隔共に 1 秒とし，300 mm, 61 点を約 2 分で計測する．

4-3 計測結果

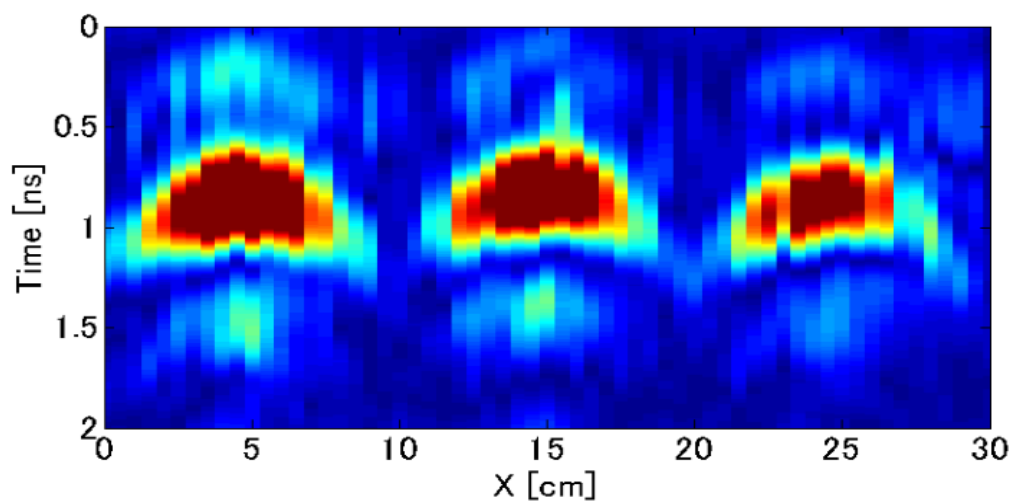
本項では，新規のシステムで計測した結果に加え，既往のシステムでの計測結果との比較を行った結果並びに新規システムの有用性について述べる．

4-3-1 計測結果

移動計測により得られた無変調成分，並びにドップラ成分のレーダプロファイルを Fig. 4-4 に，Fig. 4-4 のレーダプロファイルに合成開口処理を行ったイメージング結果を Fig. 4-5 に示す．

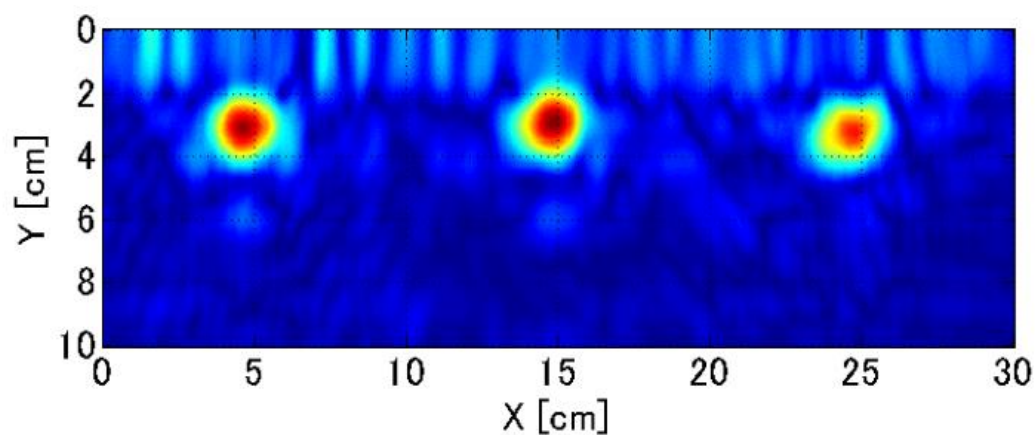


(a) 無変調成分

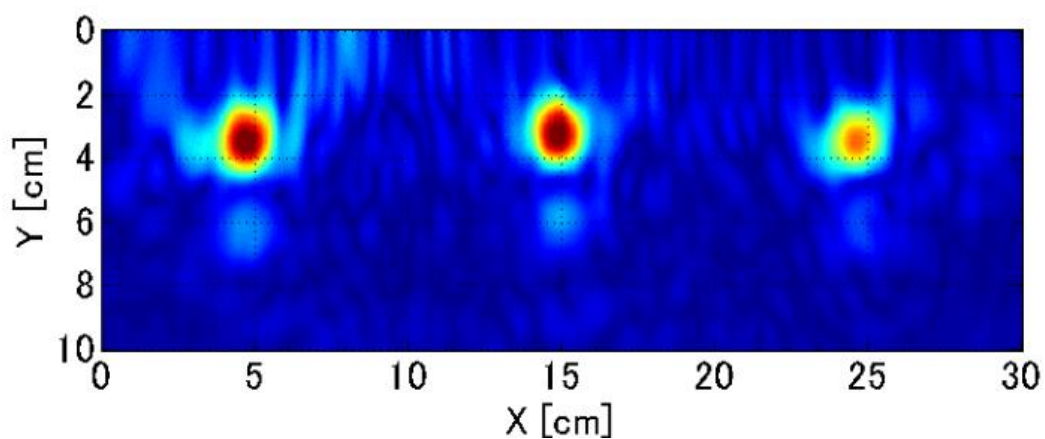


(b) ドップラ成分

Fig. 4-4 3 鉄筋供試体における新規システム計測によるレーダプロファイル



(a) 無変調成分



(b) ドップラ成分

Fig. 4-5 Fig. 4-4 の合成開口処理結果

Fig. 4-4 のレーダプロファイルでは、無変調成分、ドップラ成分共に 1 ns 付近に 100 mm の間隔で放物線上のプロファイルが見られ、鉄筋の明瞭な応答が確認できる。

Fig. 4-5 のイメージング結果では、かぶり 30 mm の位置に明瞭な鉄筋反射が確認でき、初期位相の補正によりドップラ成分の位相が揃うことで合成開口処理による周囲の不要な反射成分も低減されていることがわかる。これより、位相補正の有効性が確認できた。

4-3-2 既往のシステムとの比較

既往の計測システムを用いて、同様の供試体、移動機構での計測を行った際のレーダプロファイルを図. 4-6 に、合成開口処理を行い、イメージングを行った結果を図. 4-7 に示す。

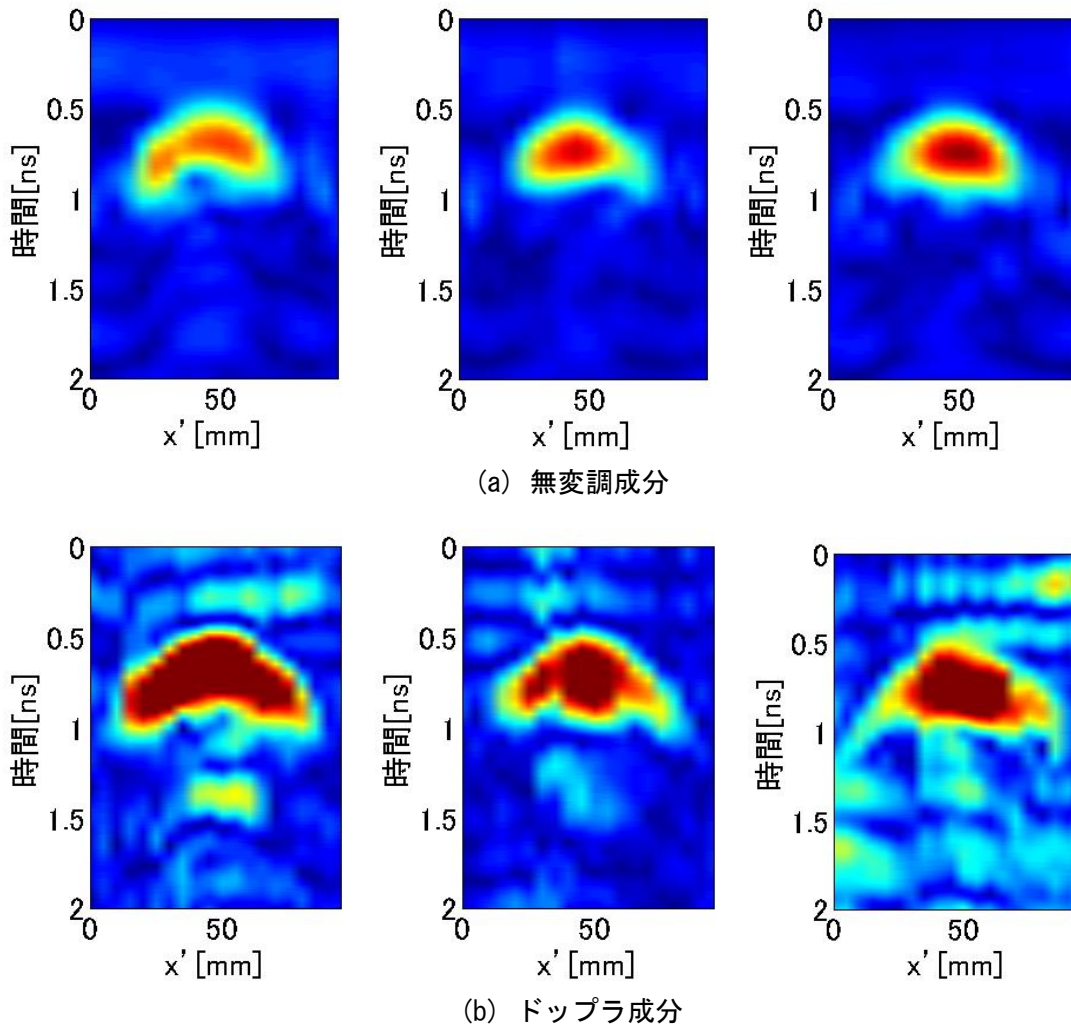
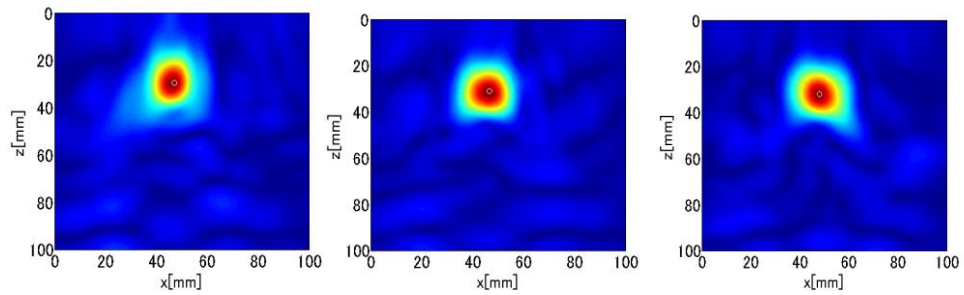
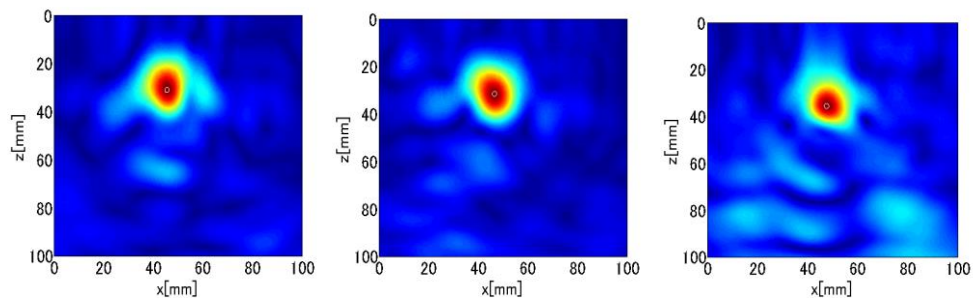


Fig. 4-6 3 鉄筋供試体における既往のシステム計測によるレーダプロファイル



(a) 無変調成分



(b) ドップラ成分

Fig. 4-7 Fig. 4-6 の合成開口処理結果

既往のシステムでは、1 点の計測に 120 秒ほどかかり、一度に 60 点の計測を行うと励磁コイルに負荷がかかるため、鉄筋 1 本分(計測点数で言えば 20 点)毎の移動計測となっている。

加振パルスレーダシステムと既往のシステム双方のドップラ成分のイメージング結果から、鉄筋反射部分の応答を除いた周囲のノイズレベルを比較したところ、新規システムの方が最大で 2 倍程度優れた S/N 比を有することが確認できた。

また、それぞれのイメージング結果から振動変位を算出した。イメージングベースでの振動変位 δ は、無変調成分、ドップラ成分の鉄筋位置のピーク値をそれぞれ A_0 、 A_D とし、コンクリート中の電磁波伝搬速度を v とした時、以下の式で表せる。

$$\delta \cong \frac{A_D'}{A_0} \times v \quad (4-5)$$

求めた振動変位を比較したものを Fig. 4-8 に示す。

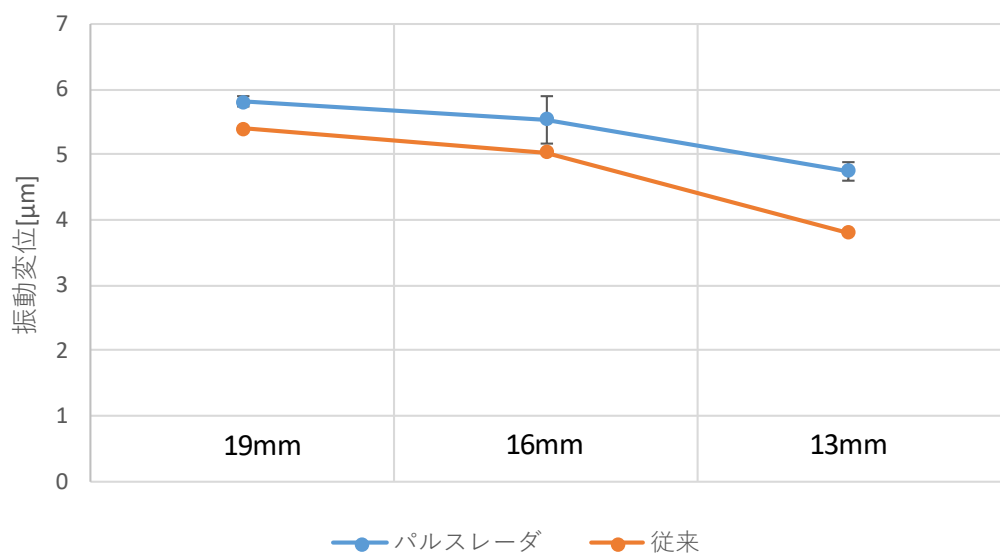


Fig. 4-8 かぶり 30 mm の供試体の加振レーダ計測における振動変位比較

パルスレーダの振動変位に関しては、追加での計測を行い、4 測線の平均及び標準偏差を示している。パルスレーダ、加振レーダ共に、鉄筋径 19 mm が最も振動変位が大きく、次点で 16 mm となっているが、こちらに関しては 5% 程度の誤差がみられた。また、13 mm 鉄筋では振動変位が他の鉄筋径よりもやや落ちる結果となったが、これは、鉄筋の細径化と共に励磁コイルからの加振力が低下するためであり、妥当な結果が得られたと考えられる。

以上より、多少の値の差はあるものの、加振レーダと同様に鉄筋 RC 供試体の計測可能であるに加えて、加振レーダでは 120 秒程度かかっていた計測時間を同一の SN 比に換算して比較した場合加振パルスレーダでは 0.5 秒に短縮され、約 480 倍もの高速化が実現できた。

5 章 鉄筋腐食進展に伴う振動変位変化分布

前章にて、既往の加振レーダシステムと振動変位の比較を行った。この際、計測した4側線の振動変位結果に数%の誤差が生じていた。健全供試体での計測において計測場所により振動変位が多少変化していたと場合、腐食が進んだ供試体では計測場所によって更に大きな差が生じる可能性がある。このため、鉄筋軸方向に移動計測を行うことでより定量的に振動変位評価を行うことができると考えられる。また、鉄筋が部分的に腐食していた場合、表面上に現れない腐食場所を移動計測による振動変位評価にて特定できる可能性がある。以上2点の確認のため、電食実験により供試体を強制的に腐食させ振動変位が変化、並びに振動変位上昇の分布計測を行った。本章では、この実験概要及び結果、考察について詳述する。

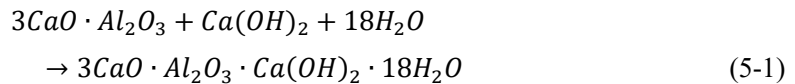
5-1 電食におけるコンクリート中の鉄筋腐食原理

本項では、電食実験原理に先立ってコンクリート組成、並びに鉄筋コンクリート内部の鉄筋が腐食する原理について述べる。

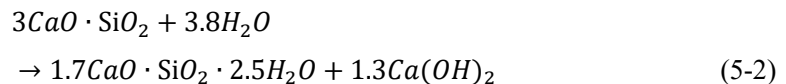
5-1-1 コンクリートの組成

まず、コンクリートの生成手順について簡単に述べる。コンクリートは、主に骨格となる石や砂利などの骨材を主とし、セメント、水等から成るが、コンクリートの凝固、硬化の中心はセメントと水である。セメントをつくる代表的な鉱物組織は、アルミン酸三カルシウム($3CaO \cdot Al_2O_3$)、ケイ酸三カルシウム($3CaO \cdot SiO_2$)、ケイ酸二カルシウム($2CaO \cdot SiO_2$)、鉄アルミン酸四カルシウム($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)の酸化カルシウムを主成分とした4種類である。これらの物質の水和反応を式(5-1)から式(5-4)に示す。

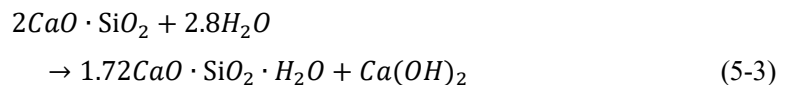
[$3CaO \cdot Al_2O_3$]



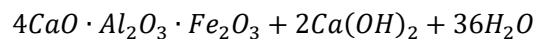
[$3CaO \cdot SiO_2$]

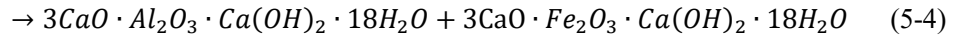


[$2CaO \cdot SiO_2$]



[$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$]





式(5-1)から式(5-4)の反応によりコンクリートは凝固、硬化していくが、これらの反応生成物は、水酸化カルシウムが中心となっている。

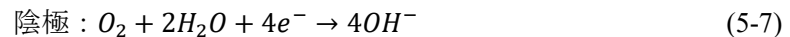
よってコンクリートの水和反応は式(5-5)のように簡単化できる。



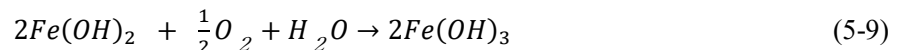
これより、生成されたコンクリートは強いアルカリ性を示すことがわかる。コンクリートの劣化の中に中性化というものが存在するが、これは外部から侵入した酸性物質によりコンクリートが強アルカリ環境を保てなくなり強度が落ちるものである。

5-1-2 鉄筋腐食原理

前項でも述べた通り、コンクリートは強アルカリ環境となっているが、鉄筋表面は厚さ2~6 nmの緻密な水酸化物($\gamma Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)から成る不導体被膜を形成することにより、腐食の要因から保護されている。しかし、コンクリートの中性化や、外部からの塩化物イオン(Cl^-)の侵入により鉄筋を保護している不導体被膜が破壊されると鉄筋の腐食が進行し始める。したがって、鉄筋の腐食はコンクリートの劣化が大きな原因因子となっている。不導体被膜が破壊され水分が浸透すると、鉄筋表面に局部電池が形成され、陽極となる鉄筋から鉄イオン(Fe^{2+})が水に溶解し、コンクリート内部へと流出することで鉄筋の腐食が進行していく。この際に起こる化学反応を以下に示す。



式(5-6)、(5-7)で生成した鉄イオン(II)と水酸化物イオンが以下のような反応を示す。



式(5-8)より、鉄筋から溶解出した Fe^{2+} が $Fe(OH)_2$ として鉄筋表面に発生する。この化合物が酸化し、水酸化第二鉄 $Fe(OH)_3$ となる。その後、水分を失うことで式(5-10)にあるような Fe_2O_3 (赤錆)、または式(5-11)のような水和酸化物($FeOOH$)となる。この時、一部は酸化が不十分となり Fe_3O_4 (黒錆)となり鉄筋表面に層状の酸化物を形成する。これらの他に、X線等の分析に鮮明な反応を示さない極微細な結晶の集合体である無定形錆と呼ばれる錆も存在する。

また、鉄筋に発生する錆は周囲の環境のイオンにより変化する。環境別に支配イオン並び

に生成する錆の成分をまとめたものを Table 5-1 に示す.

Table 5-1 環境による腐食生成物の違い

錆生成環境	支配イオン 液性	錆の成分
工業地帯	SO_2, SO_4^{2-} 酸性~中性	$\alpha - FeOOH, \gamma - FeOOH \gg Fe_3O_4$ 硫酸鉄塩, 無定形錆
海岸地帯	Cl^- 中性~アルカリ性	$Fe_3O_4 > \alpha - FeOOH > \gamma - FeOOH$ $\beta - FeOOH$, 無定形錆
田園地帯	- 中性	$\gamma - FeOOH, \alpha - FeOOH, Fe_3O_4$ 無定形錆

5-2 電食実験原理

電食実験では, 前項にて述べた鉄筋の酸化反応を強制的に起こすことで, 電流値並びに通電時間を変えることにより鉄筋の腐食量を制御する. 電食実験の概要を Fig. 5-1 に示す.

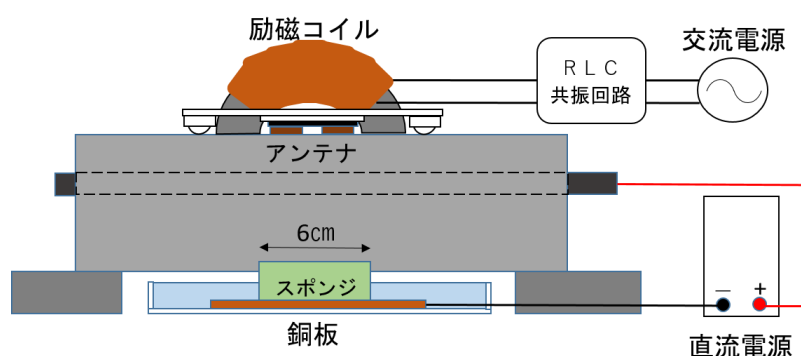


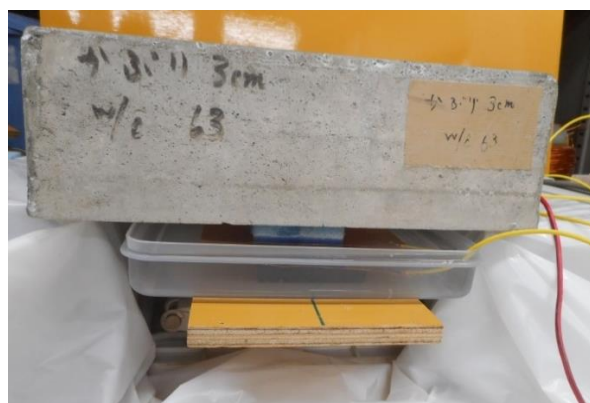
Fig. 5-1 電食実験概要図

Fig. 5-1 より, 鉄筋をアノード, 銅板をカソードとして, 鉄筋-銅板間に電流を印加し, 鉄筋の腐食を促進させる. また, 鉄筋-銅板間にスポンジを挟み, 供試体中央部にのみ塩水が浸透するようになっている. これにより, 鉄筋の腐食が供試体中央部から進み, 供試体内部から錆が進み実地での腐食を模擬することが可能である.

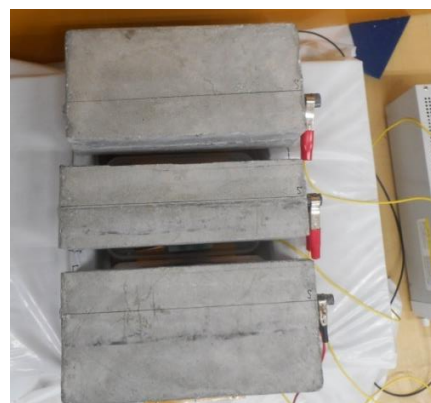
5-3 実験概要

Fig. 5-2 に実験の様子を示す. 実験に使用した RC 供試体は, 第 4 章のシステム比較にて使用した W400×H100×D300, 鉄筋径 190 mm, 160 mm, 130 mm の 3 本がかぶり 30 mm に埋設された供試体を鉄筋の両端 50 mm の部分で切断, 供試体を 3 つに分割し, W150×H100×D300

と W100×H100×D300 の 2 種類にしたものである．この供試体を電食と並行して，鉄筋直上長手方向へ 300 mm 移動計測を行った．計測機構も第 4 章にて用いたものと同様のものだが，計測方向が異なるため，計測治具を 90 度回転させて使用した．Fig. 5-1 の通りに供試体を配置した．配置後の写真を Fig. 5-2 に示す．



(a) 供試体側面



(b) 供試体上面

Fig. 5-2 電食実験配置

電食に使用した塩水は濃度 10% のものとし，3 つの供試体を直列に接続し電食を行った．印加電流は塩水が浸透しインピーダンスが低下するまでは 10 mA，インピーダンス低下後は 50 mA にて積算電流 10 A・h まで電食を行った．

5-4 電食実験における鉄筋振動変位評価

5-4-1 イメージング結果

積算電流 3 A・h の段階にて鉄筋径 190 mm の供試体の鉄筋端部，3.5 A・h にて鉄筋径 160 mm の供試体の鉄筋端部からそれぞれ錆汁の漏出が確認された．その際の供試体の様子を Fig. 5-3(a),(b) にそれぞれ示す．この際，鉄筋端部以外からの錆汁漏出は確認されず，供試体にひび割れも確認できなかった．また，積算電流 6 A・h にて鉄筋径 130 mm の供試体の上面（計測開始地点から 130~150 mm 付近）から錆汁の漏出が確認された．これを Fig. 5-4 に示す．この時，錆汁の漏出部分にひび割れは確認できず，漏出量も零ができる程度の少量のものであった．



(a) 鉄筋径 190 mm



(b) 鉄筋径 160 mm

Fig. 5-3 錆汁漏出の様子

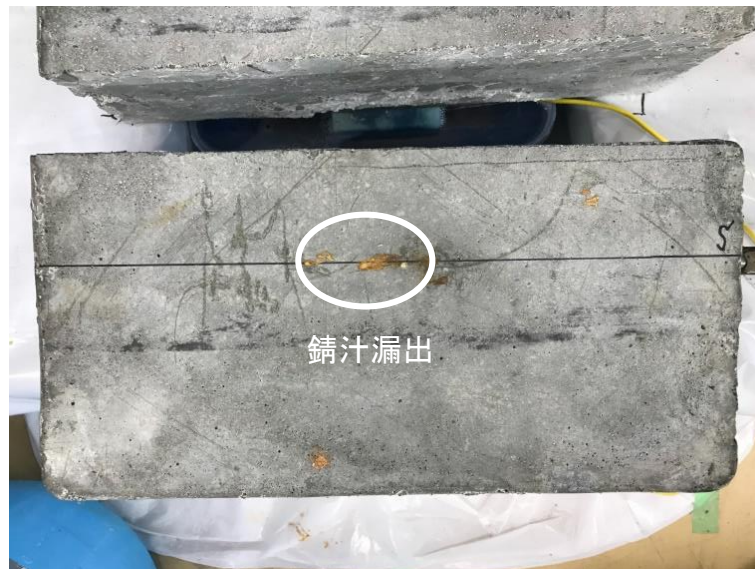
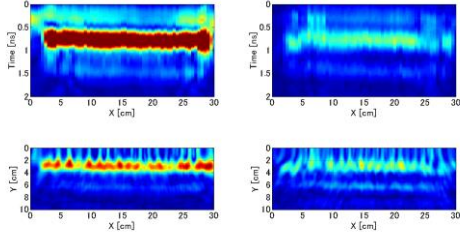
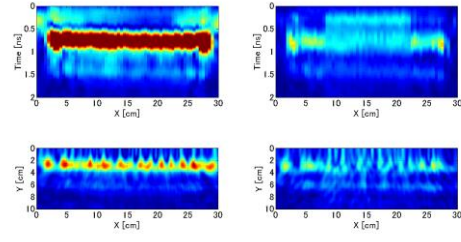


Fig. 5-4 鉄筋径 130 mm供試体における錆汁漏出の様子

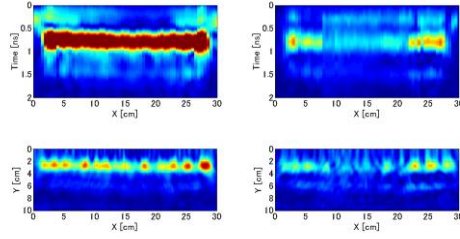
電食時の積算電流毎におけるイメージング結果を鉄筋径 190 mm, 160 mm, 130 mm の順に, それぞれ Fig. 5-5, Fig. 5-6, Fig. 5-7 に示す. 図中, 上 2 つが, 左から直流成分とドップラ成分のレーダプロファイルであり, 下 2 つがそれぞれを合成開口処理したものになる. 尚この際, 電流は 7 A とした. また, 計測の始点と終点は励磁コイルのコアが鉄筋端部よりも外側に存在し, 適正な加振が行われていない可能性が高く, 計測結果の両端 50 mm は参考値とする.



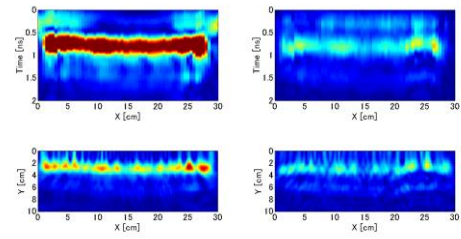
(a) 積算電流 $0 \text{ A} \cdot \text{h}$



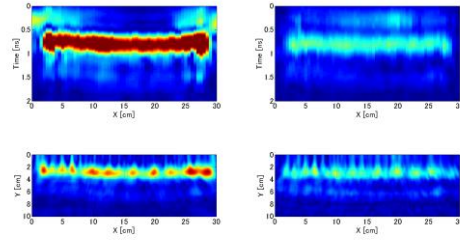
(b) 積算電流 $0.5 \text{ A} \cdot \text{h}$



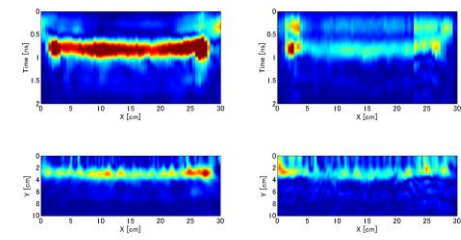
(c) 積算電流 $1.0 \text{ A} \cdot \text{h}$



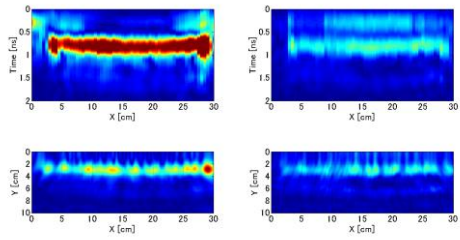
(d) 積算電流 $2.0 \text{ A} \cdot \text{h}$



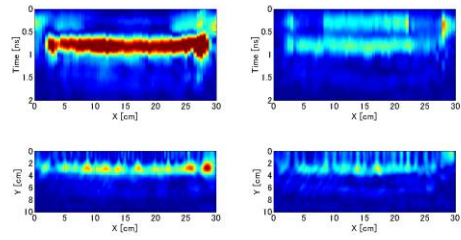
(e) 積算電流 $3.0 \text{ A} \cdot \text{h}$



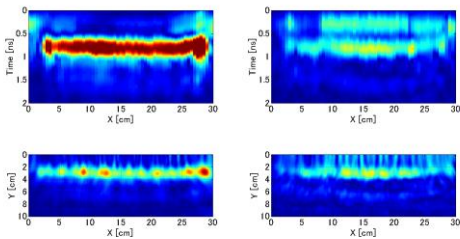
(f) 積算電流 $3.5 \text{ A} \cdot \text{h}$



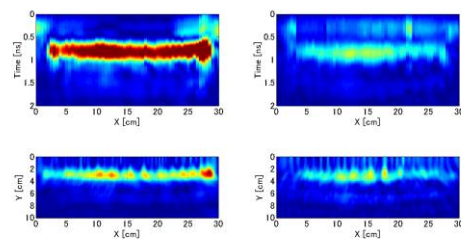
(g) 積算電流 $4.0 \text{ A} \cdot \text{h}$



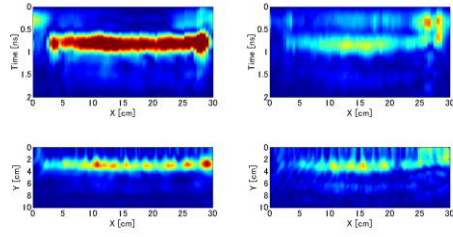
(h) 積算電流 $4.5 \text{ A} \cdot \text{h}$



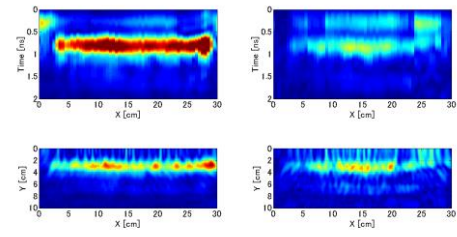
(i) 積算電流 $5.0 \text{ A} \cdot \text{h}$



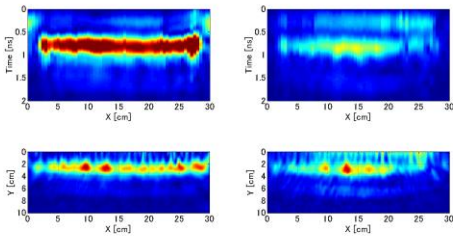
(j) 積算電流 $5.5 \text{ A} \cdot \text{h}$



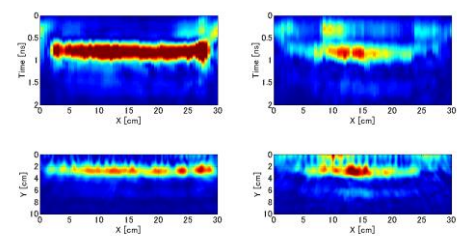
(k) 積算電流 6.0A · h



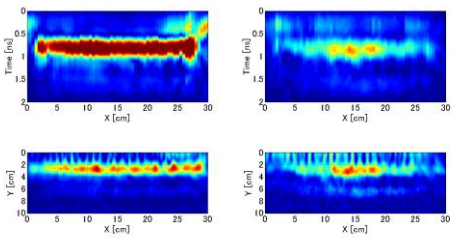
(l) 積算電流 6.5A · h



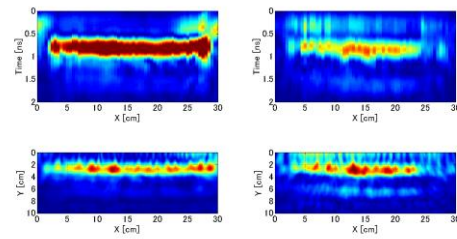
(m) 積算電流 7.0A · h



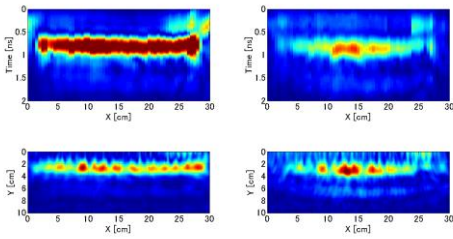
(n) 積算電流 7.5A · h



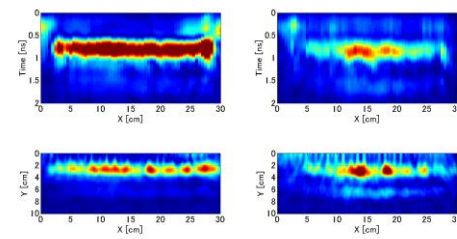
(o) 積算電流 8.0A · h



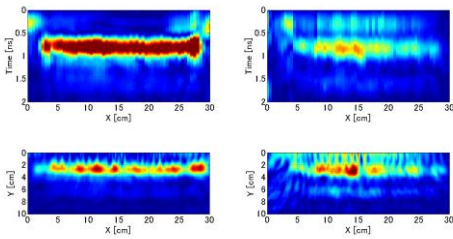
(p) 積算電流 8.5A · h



(q) 積算電流 9.0A · h

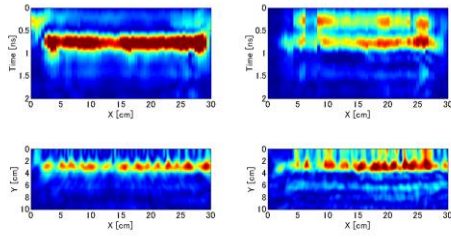


(r) 積算電流 9.5A · h

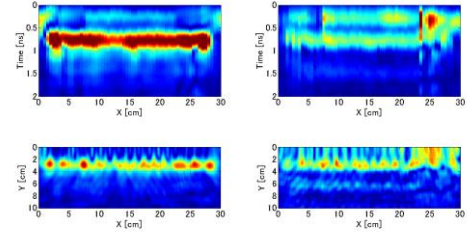


(s) 積算電流 10.0A · h

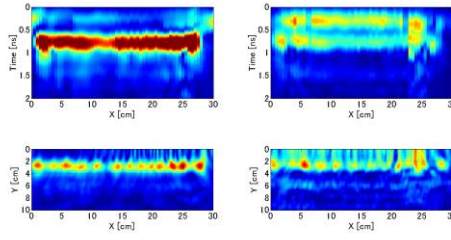
Fig. 5-5 鉄筋径 190 mmイメージング結果



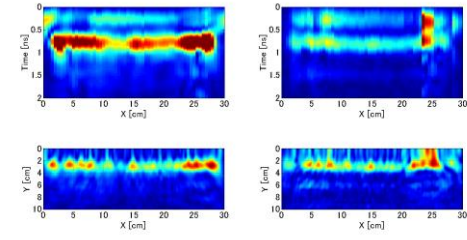
(a) 積算電流 $0.0A \cdot h$



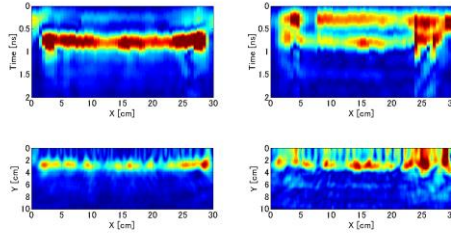
(b) 積算電流 $0.5A \cdot h$



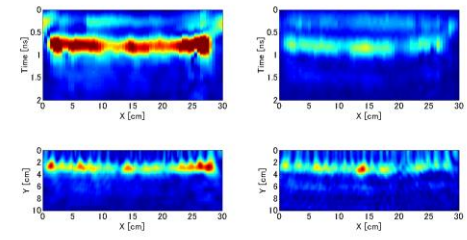
(c) 積算電流 $1.0A \cdot h$



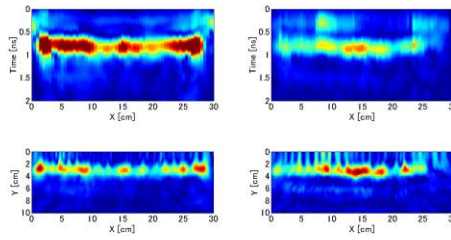
(d) 積算電流 $2.0A \cdot h$



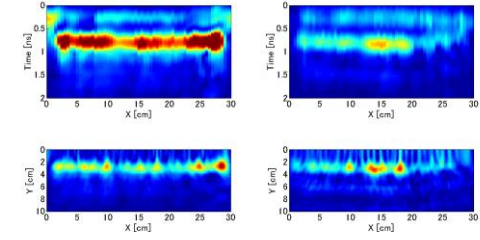
(e) 積算電流 $3.0A \cdot h$



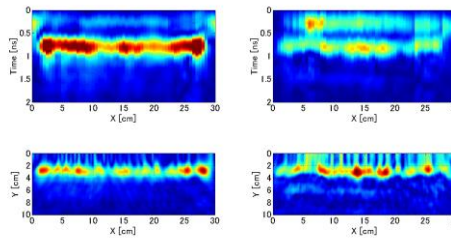
(f) 積算電流 $3.5A \cdot h$



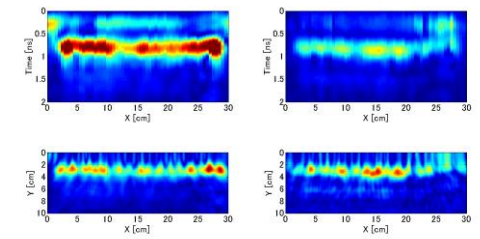
(g) 積算電流 $4.0A \cdot h$



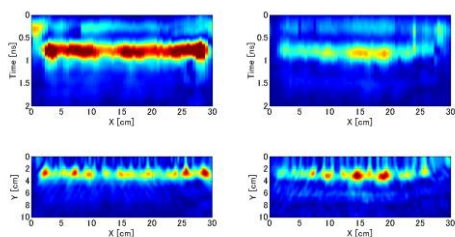
(h) 積算電流 $4.5A \cdot h$



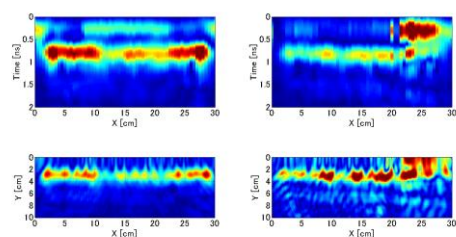
(i) 積算電流 $5.0A \cdot h$



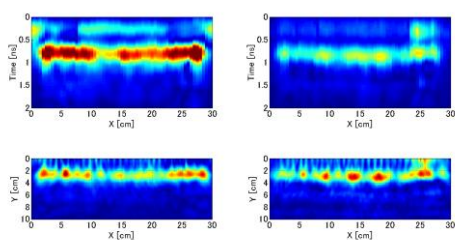
(j) 積算電流 $5.5A \cdot h$



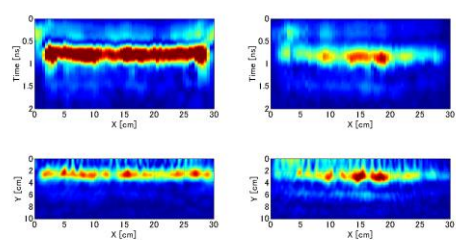
(k) 積算電流 $6.0A \cdot h$



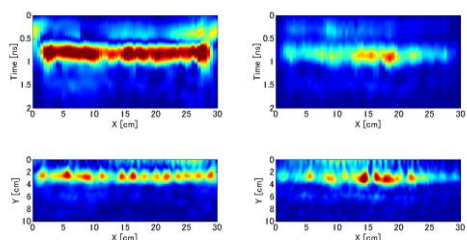
(l) 積算電流 $6.5A \cdot h$



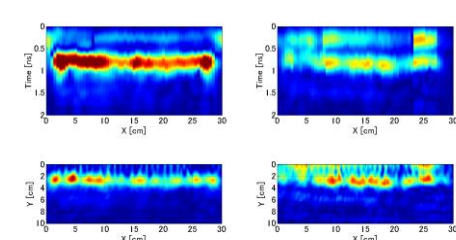
(m) 積算電流 $7.0A \cdot h$



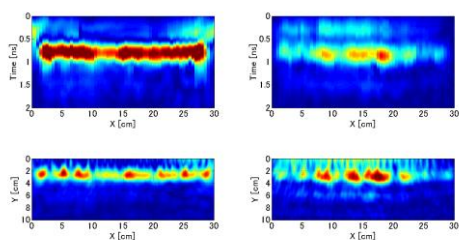
(n) 積算電流 $7.5A \cdot h$



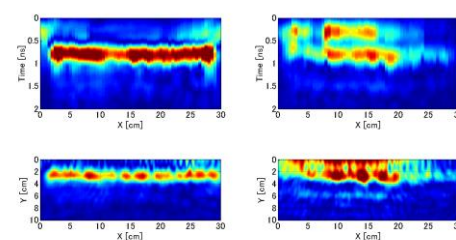
(o) 積算電流 $8.0A \cdot h$



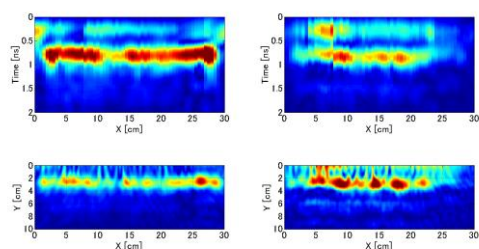
(p) 積算電流 $8.5A \cdot h$



(q) 積算電流 $9.0A \cdot h$

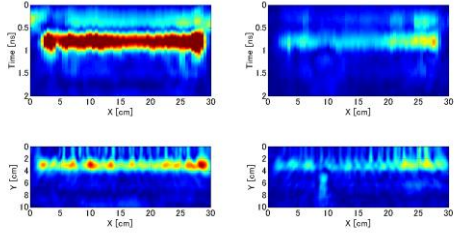


(r) 積算電流 $9.5A \cdot h$

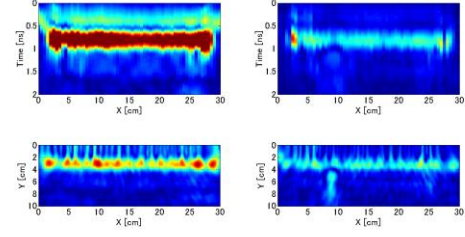


(s) 積算電流 $10.0A \cdot h$

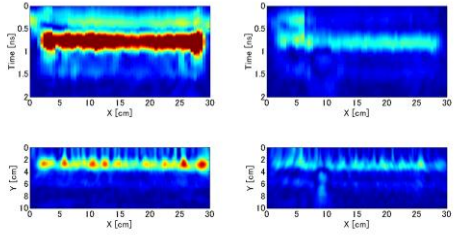
Fig. 5-6 鉄筋径 160 mmイメージング結果



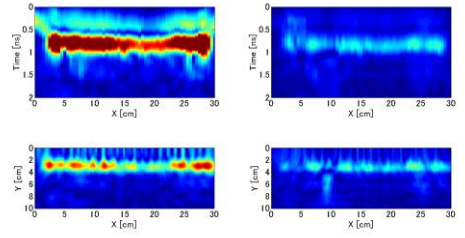
(a) 積算電流 $0.0\text{ A} \cdot \text{h}$



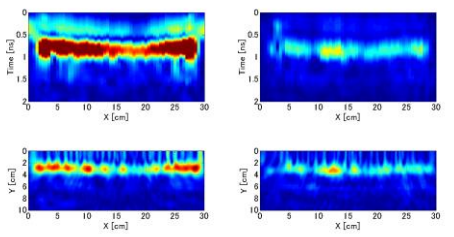
(b) 積算電流 $0.5\text{ A} \cdot \text{h}$



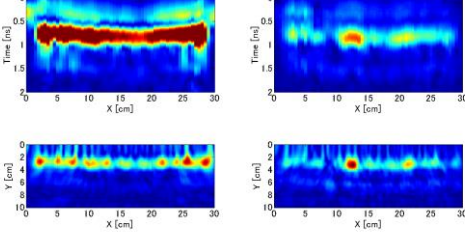
(c) 積算電流 $1.0\text{ A} \cdot \text{h}$



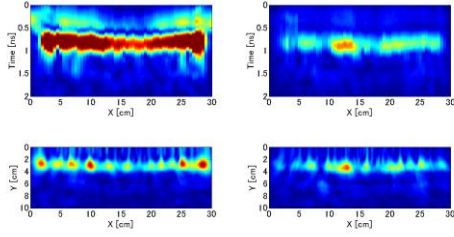
(d) 積算電流 $2.0\text{ A} \cdot \text{h}$



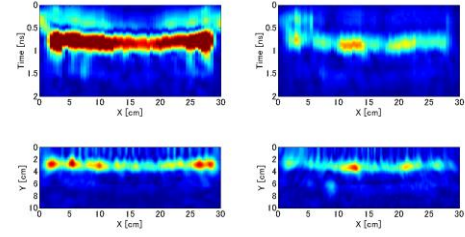
(e) 積算電流 $3.0\text{ A} \cdot \text{h}$



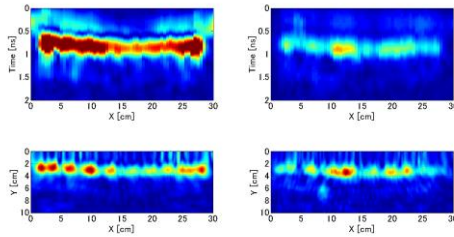
(f) 積算電流 $3.5\text{ A} \cdot \text{h}$



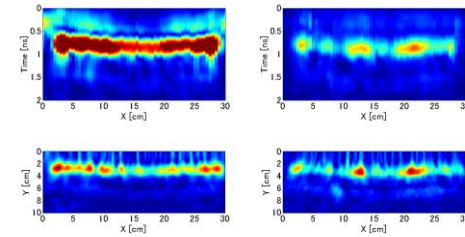
(g) 積算電流 $4.0\text{ A} \cdot \text{h}$



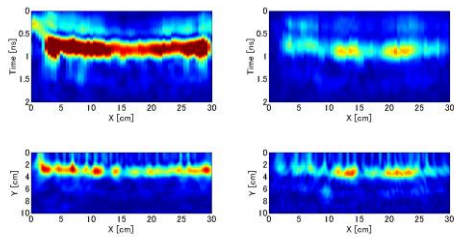
(h) 積算電流 $4.5\text{ A} \cdot \text{h}$



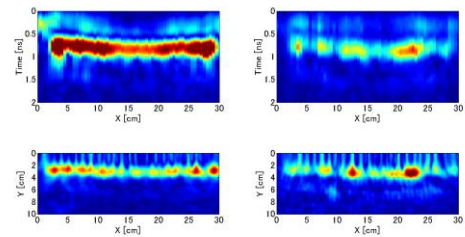
(i) 積算電流 $5.0\text{ A} \cdot \text{h}$



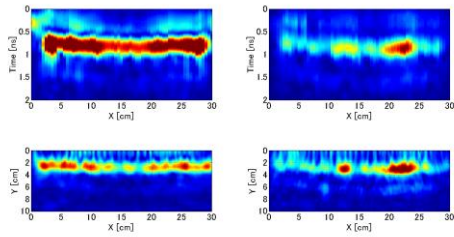
(j) 積算電流 $5.5\text{ A} \cdot \text{h}$



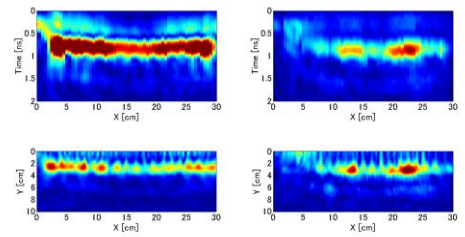
(k) 積算電流 6.0A · h



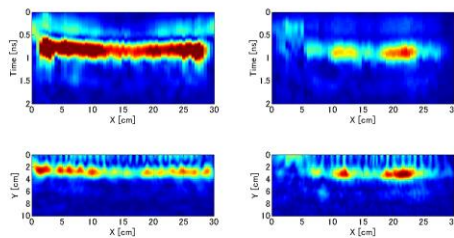
(l) 積算電流 6.5A · h



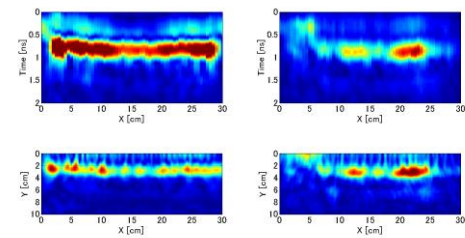
(m) 積算電流 7.0A · h



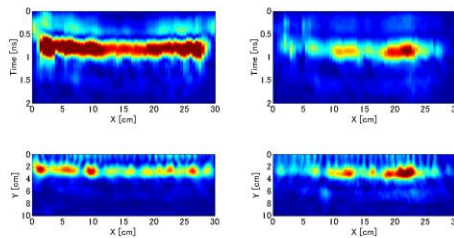
(n) 積算電流 7.5A · h



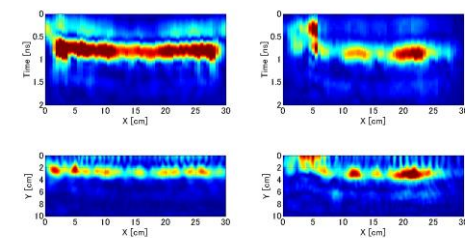
(o) 積算電流 8.0A · h



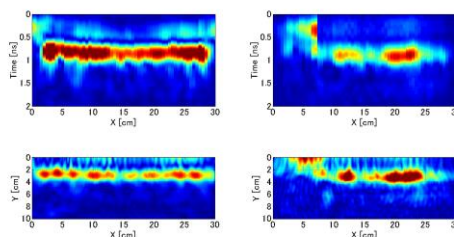
(p) 積算電流 8.5A · h



(q) 積算電流 9.0A · h



(r) 積算電流 9.5A · h



(s) 積算電流 10.0A · h

Fig. 5-7 鉄筋径 130 mmイメージング結果

5-4-2 振動変位分布

Fig. 5-5~Fig. 5-7 までの各積算電流でのイメージング結果を元に、振動変位の空間分布を算出し、積算電流毎に縦に並べた結果を Fig. 5-8 に示す。この時、マイグレーション処理の原理上計測データ両端 50 mm は参考値であるため除外する。

Fig.5-8 より、積算電流の増加に伴い、鉄筋径 130 mm 供試体では計測開始位置から 12 cm と 17~25 cm 付近に、160 mm 供試体では 10 cm, 14 cm, 18 cm 付近に、190 mm では 14 cm 付近にそれぞれ振動変位の局所的な上昇が確認された。また、鉄筋径 130 mm 及び 160 mm に関しては積算電流 3A 付近から振動変位の上昇が見られるのに対し、190 mm では 5 A 付近からの上昇が見られた。これは全ての鉄筋に同一の電流を印加したため、鉄筋径による単位面積あたりの電流量が異なり腐食の進行度に差が出た可能性が考えられる。

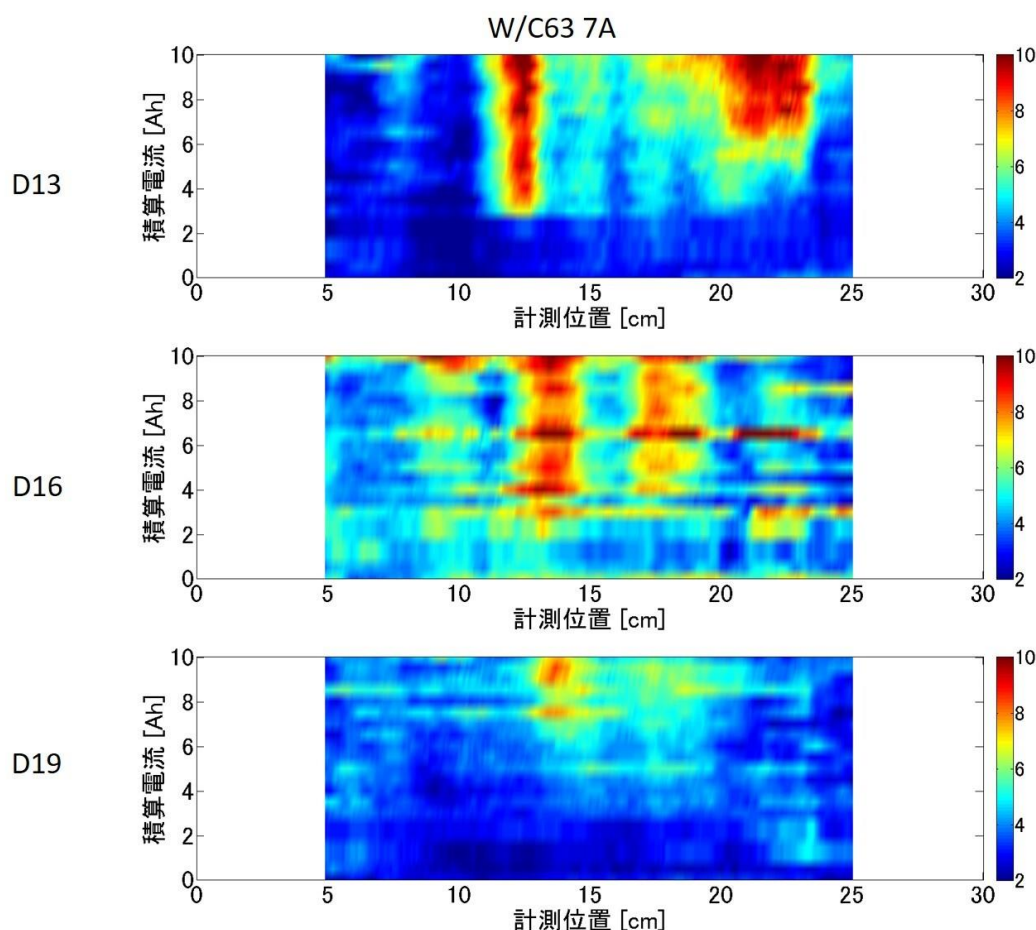


Fig. 5-8 鉄筋振動変位分布

5-4-3 鉄筋の腐食評価

電食後の各供試体を鉄筋に沿って縦に分割した際、側面側からみた写真を Fig. 5-9~Fig. 5-11 に示す。



Fig. 5-9 電食後の D19 供試体



Fig. 5-10 電食後の D16 供試体

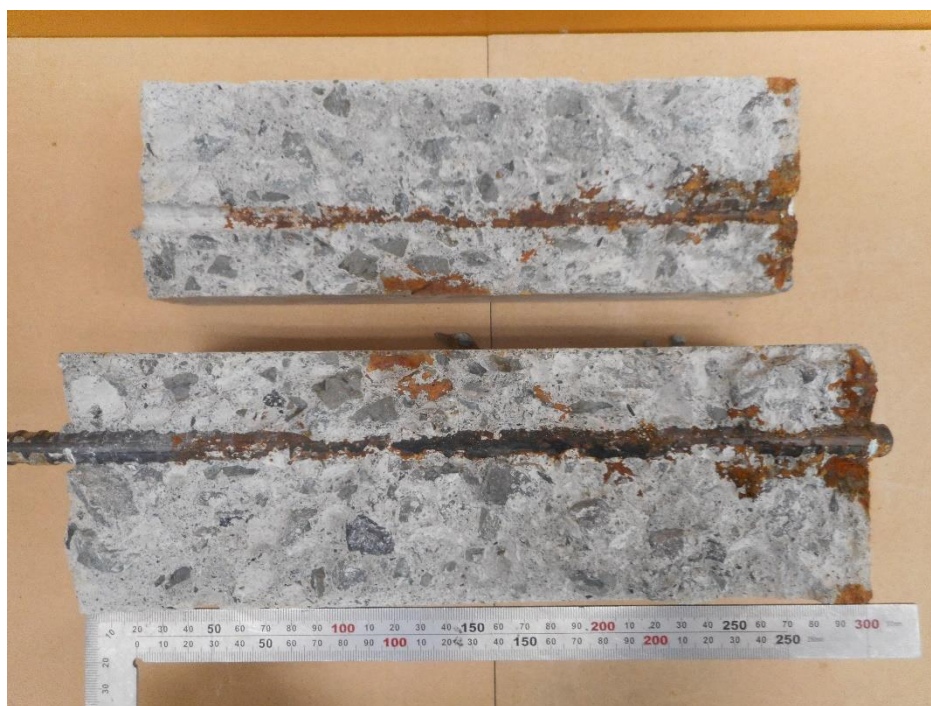


Fig. 5-11 電食後の D13 供試体

Fig. 5-9~Fig. 5-11 より，いずれの供試体も塩水浸透部分に黒錆(Fe_3O_4)の発生が確認された．一方で電食中に発生した錆汁は大気中の酸素に触れ赤錆(Fe_2O_3)としてコンクリート内外部へ浸透している様子が確認された．これに加えて，いずれの供試体においても振動変位の上昇部分に対応する鉄筋付近のコンクリートには錆汁が浸透していることが確認された．例として D13 鉄筋の供試体の汁浸透部位を Fig. 5-12 に示す．

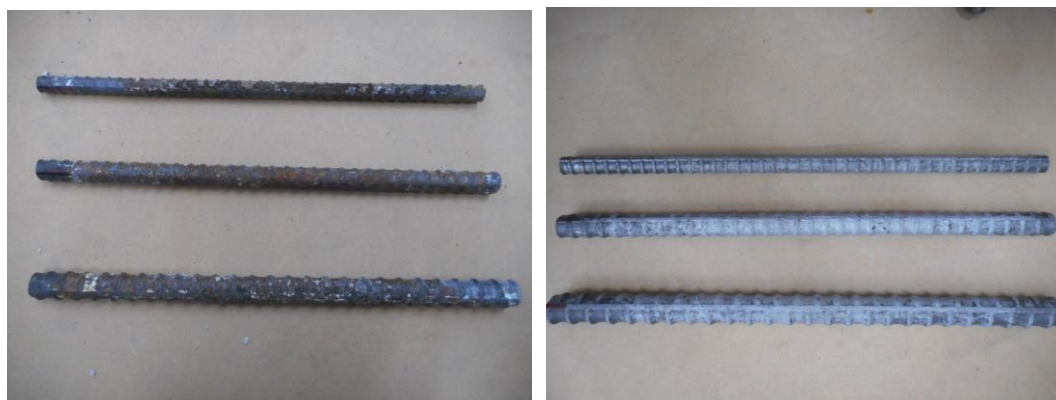


(a) 120mm 付近

(b) 200mm 付近

Fig. 5-12 D13 鉄筋上面

次に、電食実験による鉄筋の腐食分布を定量的に評価するため、10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に鉄筋を24時間浸漬させ錆の除去を行った。はつり直後の鉄筋の錆を除去する前の鉄筋と、錆を除去した後の鉄筋を Fig. 5-13 に示す。



(a) 徐錆前

(b) 徐錆後

Fig. 5-13 はつり出しした鉄筋

錆を除去した後の鉄筋を目視で確認したところ、塩水が浸透してくる下側の腐食が計測面側よりも進行していることが確認された。

また、レーザ変位計を用いて除錆した後の鉄筋の節、並びにリブをスキャンし、腐食の有無並びに大小の計測を行った。この時、計測位置は鉄筋の上下左右並びに斜め面の8側線とした。イメージングによる振動変位計測を行った300 mmを計測範囲とし、アクチュエータを15 mm/sで移動させて計測を行った。この時、A/Dコンバータのサンプリング周波数は20 kHzとした。計測の様子を Fig. 5-14 に、計測した計測面を鉄筋断面で表したものを Fig. 5-15 に、レーザ変位計での計測結果を Fig. 5-16~Fig. 5-18 に示す。



Fig. 5-14 レーザ変位計計測の様子

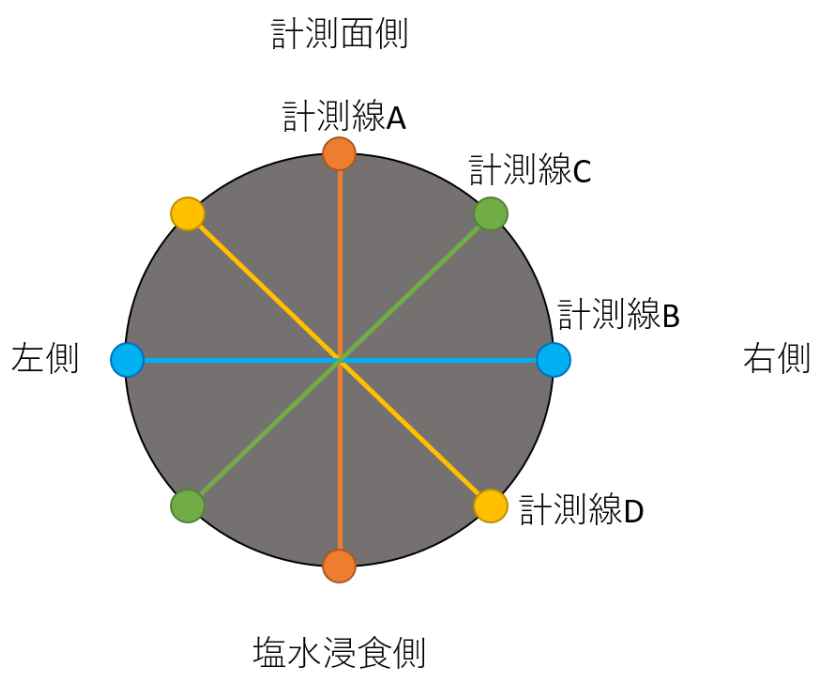
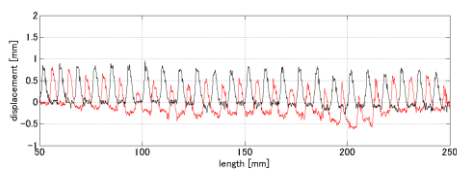
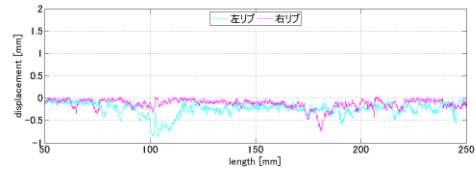


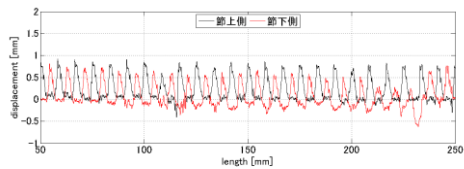
Fig. 5-15 鉄筋断面から見たスキャン概要



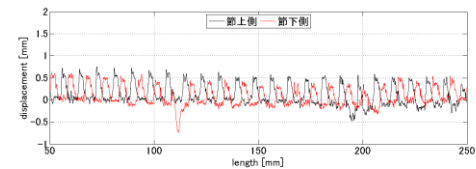
(a) 計測線 A



(b) 計測線 B

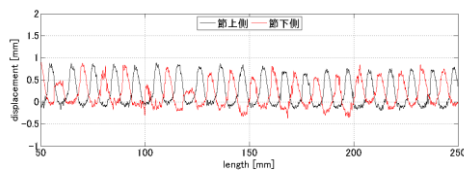


(c) 計測線 C

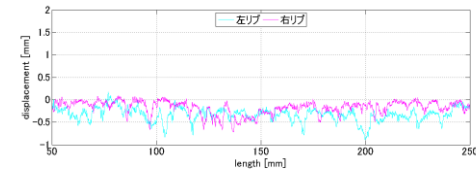


(d) 計測線 D

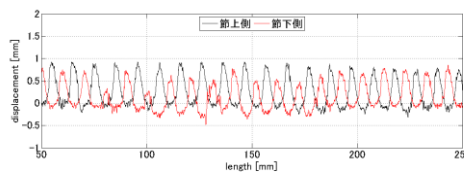
Fig. 5-16 D13 鉄筋節計測結果



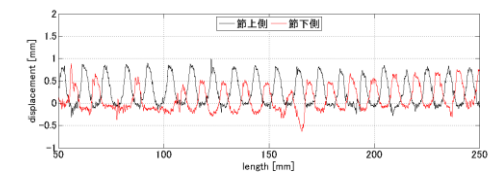
(a) 計測線 A



(b) 計測線 B

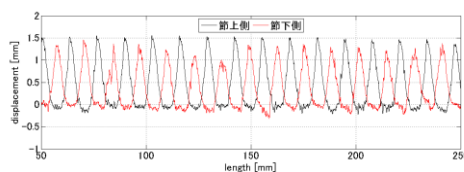


(c) 計測線 C

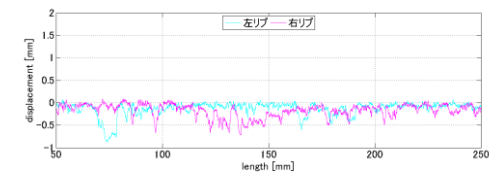


(d) 計測線 D

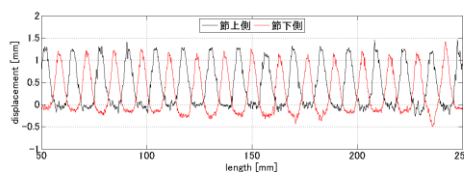
Fig. 5-17 D16 鉄筋節計測結果



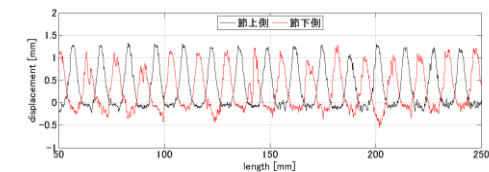
(a) 計測線 A



(b) 計測線 B



(c) 計測線 C



(d) 計測線 D

Fig. 5-18 D19 鉄筋計測結果

Fig. 5-16~Fig. 5-18 より，いずれの鉄筋径においても，塩水が浸透してくる下側中央付近では，大幅な鉄筋腐食が確認された．一方で，計測面側である上面にはあまり鉄筋の腐食は見られなかった．

また，供試体を割った際，振動変位の上昇に対応する部位のコンクリートに錆汁がみられたが，この付近の鉄筋の腐食は他の部位より進行していることが確認された．

5-4-4 振動変位評価

Table 5-1 より，電食実験では塩化ナトリウム水溶液を用いて鉄筋の腐食を促すため，支配イオンは海岸地帯同様 Cl^- となり，主要な錆成分は磁性を持つ黒錆である．加えて，強アルカリ性かつ表面ひび割れ発生前は酸素濃度が薄い環境も考慮すると黒錆が生成される可能性は極めて高い．実際に，電食供試体分割した際にも鉄筋周囲に広く黒い腐食生成物が生成されていたことが確認されている．また，鉄筋振動変位上昇部位付近で鉄筋が欠損し，振動変位の上昇部分のコンクリートに錆汁が浸透していることが確認された．これらより，振動変位の上昇には黒錆や錆汁，コンクリートの劣化に起因している可能性が考えられる．尚，この考察については第 7 章にて詳細に検討する

6 章 塩水腐食試験における供試体の振動変位評価

5 章にて振動変位の局所的な上昇を確認したが、電流を印加することで強制的に腐食を促進させる電食と、実際の腐食では進行過程が異なる可能性がある。このため、塩水浸漬と屋外暴露を 1 か月の期間で繰り返し、実際の腐食に近い腐食状況を模擬した供試体の計測を行った。本章ではこの結果について述べる。

6-1 供試体概要

通常塩水に供試体を浸漬させても塩水は中々内部に浸透せず、腐食に必要な酸素も不足する。これらの侵入を促すため、RC 構造物の火害を模して供試体の計測部位を加熱した後、塩水浸漬、屋外暴露を行った。試体寸法は $W100 \times H150 \times D1500$ の梁型供試体を使用し、鉄筋径 130 mm の鉄筋がかぶり 2 cm の位置に 2 本埋設されているものである。

Control 供試体は、加熱、塩水浸漬、屋外暴露を行わないものとした。塩水 Control 供試体では、塩水浸漬並びに屋外暴露を行った供試体となっている。下 2 つは加熱部位を鉄筋中央の鉄筋側、反対側に変えたものとなっており、いずれも塩水浸漬、屋外暴露を行ったものである。Fig. 6-1 に供試体概要として示す。

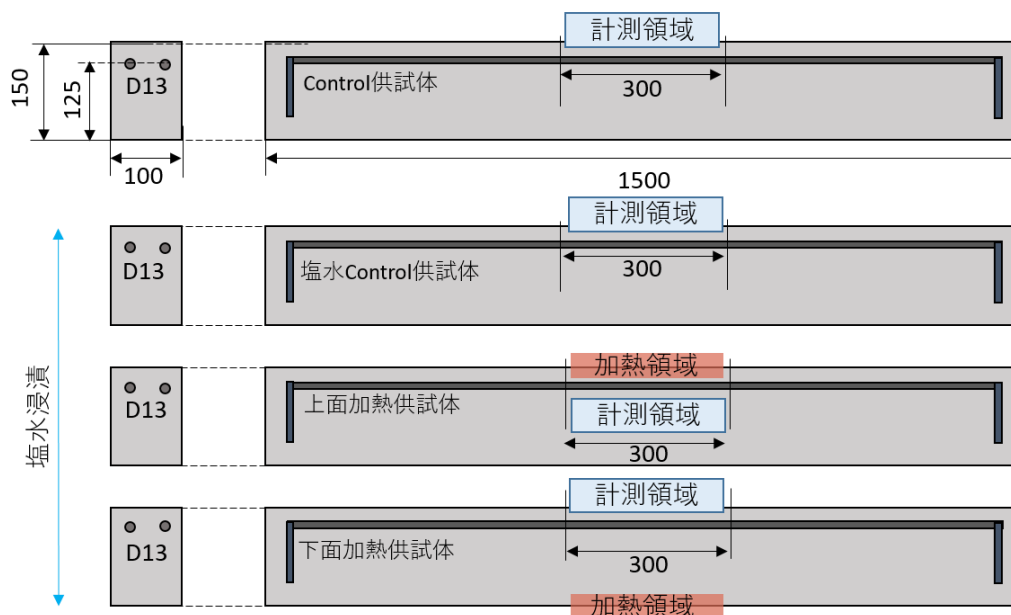


Fig. 6-1 梁型供試体概要

6-2 計測概要

計測条件並びに使用した計測機構は、第5章と同様のものとした。計測の様子を Fig. 6-2 に示す。

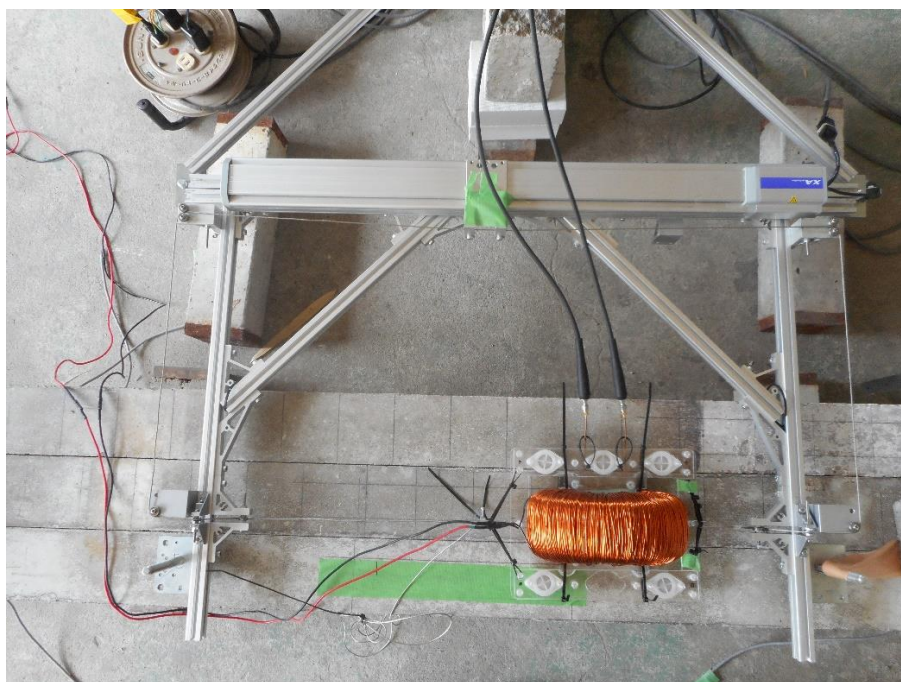


Fig. 6-2 計測の様子

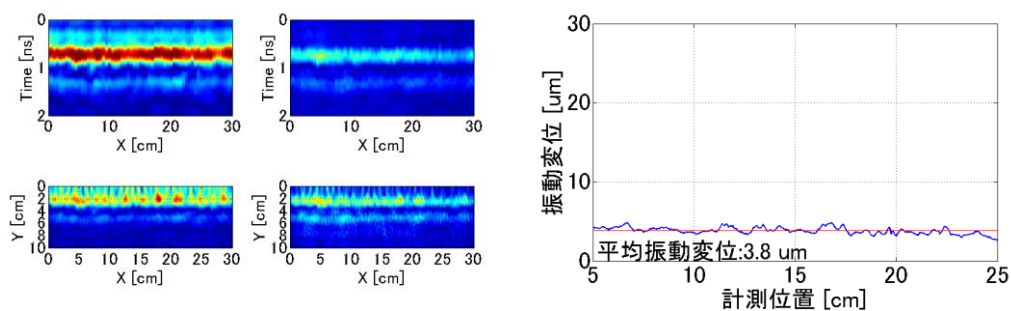
計測は2回行い、1回目の計測は1か月塩水浸漬を行った後3か月ほど屋外暴露を行ったものである。2回目の計測は1回目の計測から供試体をさらに1か月の間塩水に浸漬させた後2か月屋外暴露を行ったものを計測した。

本供試体は鉄筋が2本偏心して埋設されており、移動計測の際に供試体側面の影響を受ける可能性があった。この空隙の影響低減のため、計測供試体の両側に同型の供試体を設置しての計測を行った。また、移動計測の進行方向を前とした時、右側に埋設されている鉄筋をR鉄筋、左側に埋設されている鉄筋をL鉄筋とする。

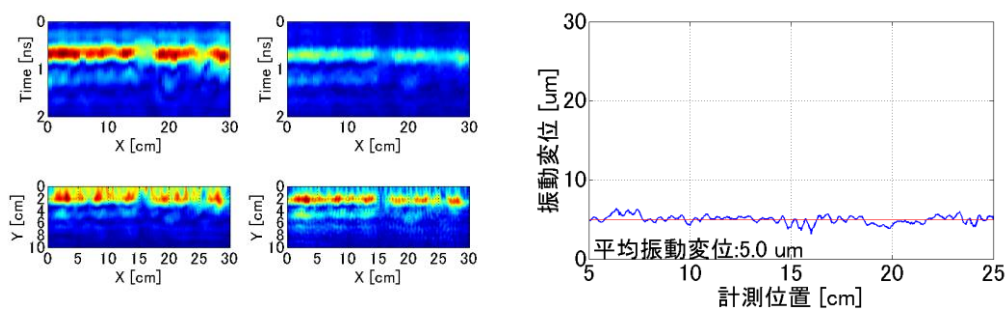
6-3 計測結果

本項では、2回にわたる計測の結果について述べる。

1回目、2回目の各供試体における計測後のイメージング結果、イメージング結果から算出した振動変位並びに各供試体の写真を Fig. 6-3~Fig. 6-18 に示す。

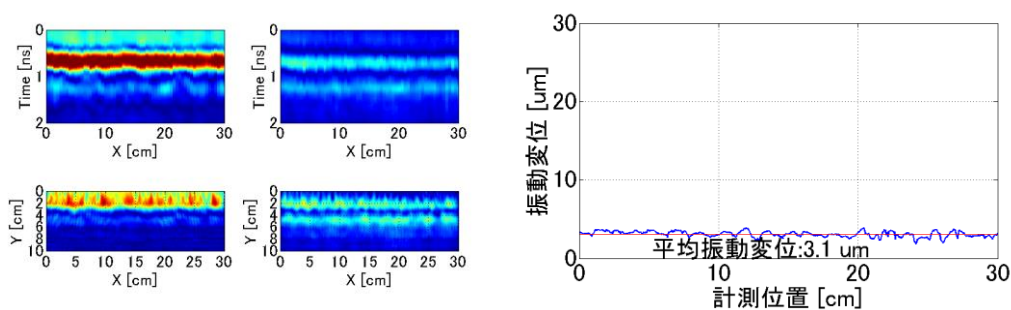


(a) L側鉄筋

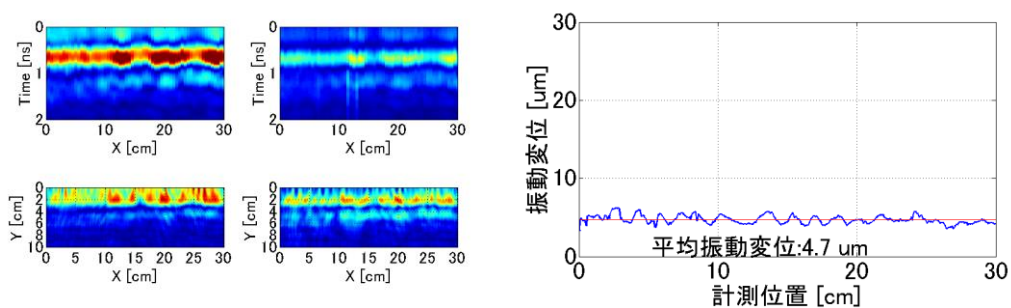


(b) R側鉄筋

Fig. 6-3 Control 供試体計測 1 回目



(a) L側鉄筋



(b) R側鉄筋

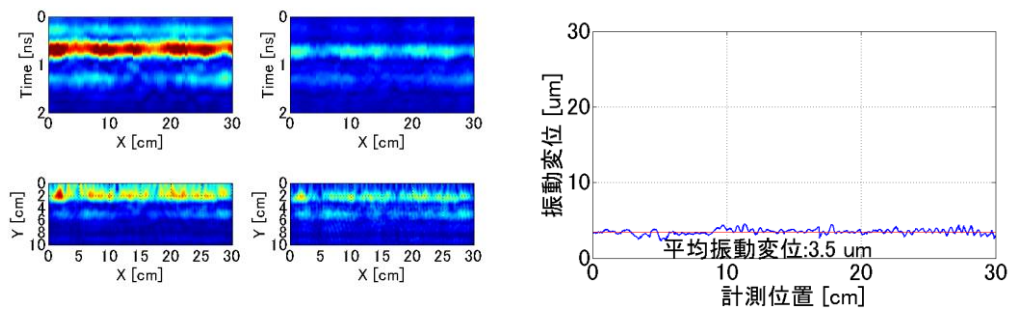
Fig. 6-4 Control 計測 2 回目



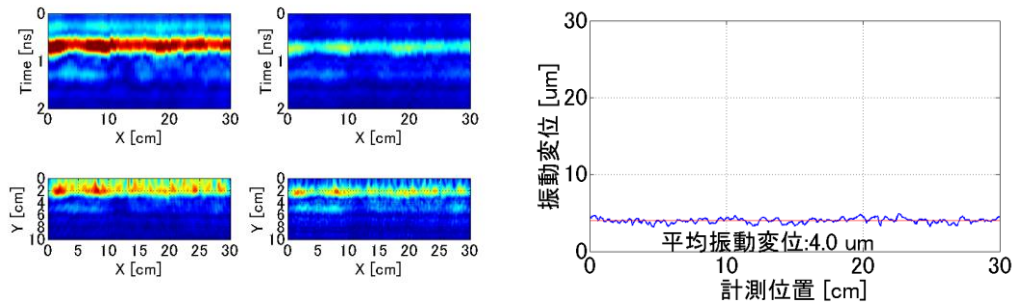
Fig. 6-5 Control 供試体計測面(1回目)



Fig. 6-6Control 供試体計測面(2回目)

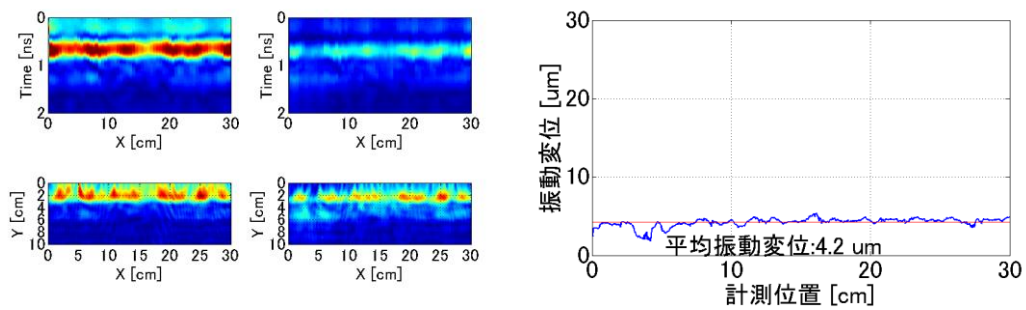


(a) L 側鉄筋

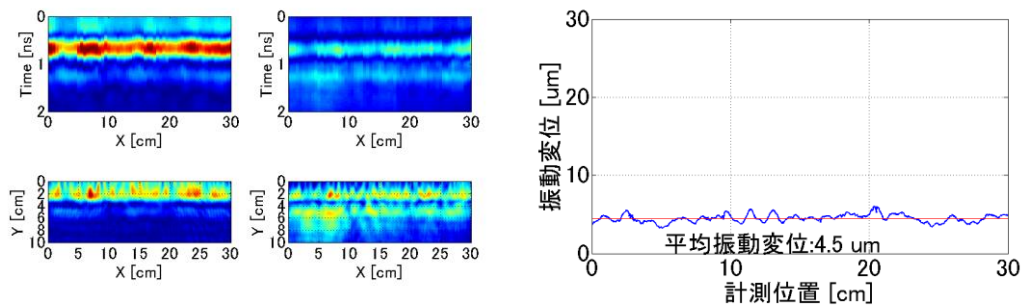


(b) R 側鉄筋

Fig. 6-7 塩水 Control 供試体 計測 1 回目



(a) L 側鉄筋



(b) R 側鉄筋

Fig. 6-8 塩水 Control 供試体 計測 2 回目

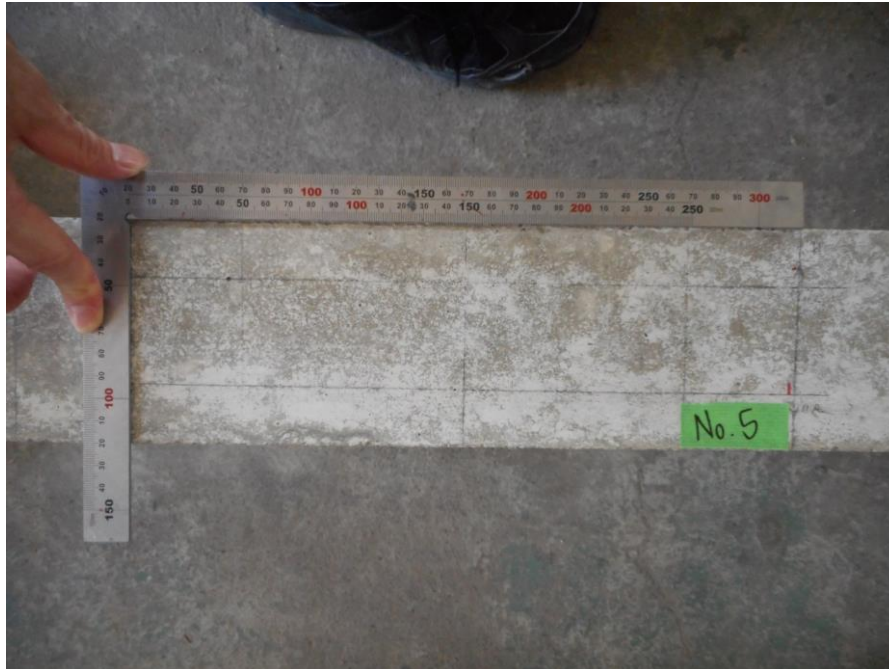


Fig. 6-9 塩水 Control 供試体計測面(1 回目)

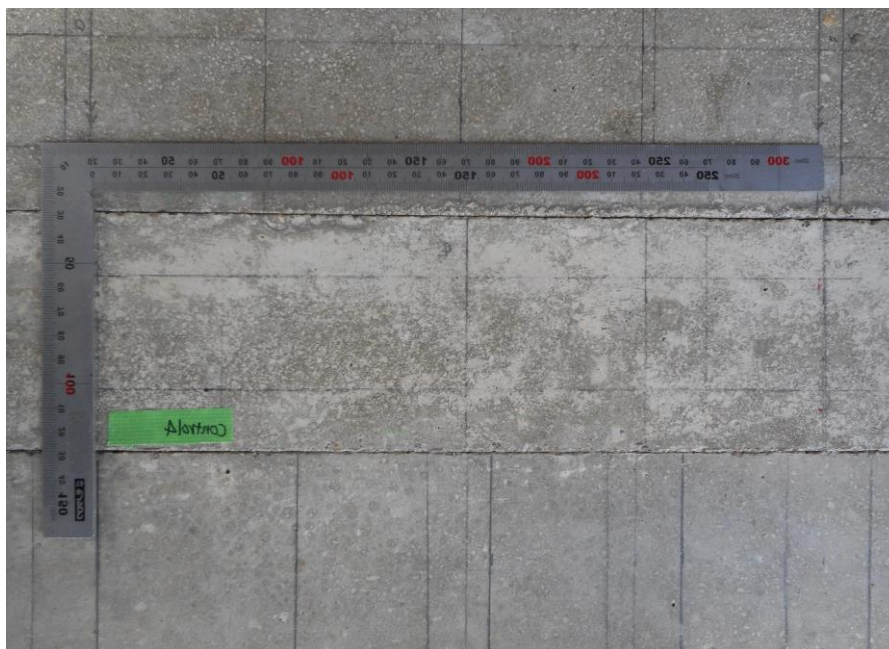
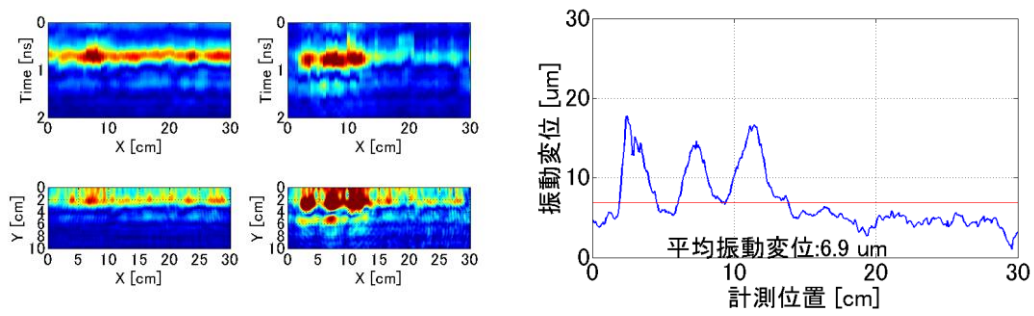
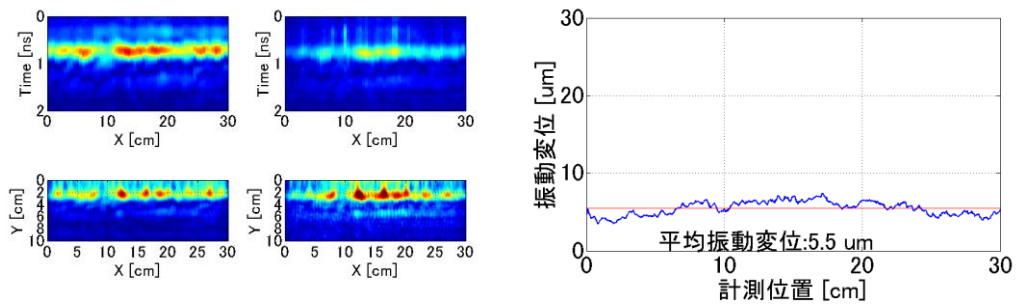


Fig. 6-10 塩水 Control 供試体計測面(2 回目)

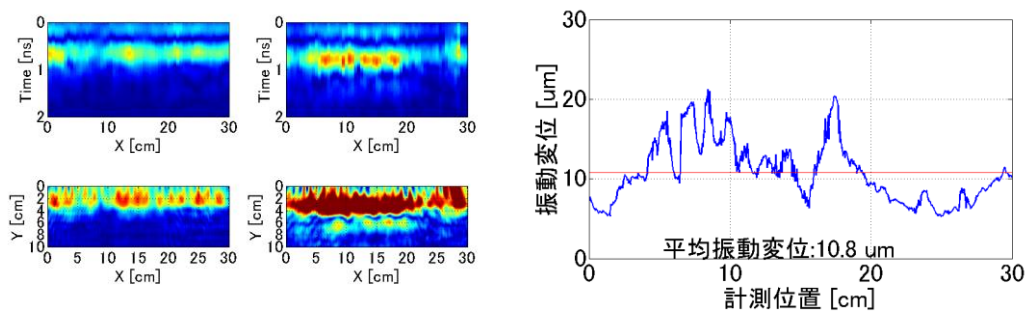


(a) L 側鉄筋

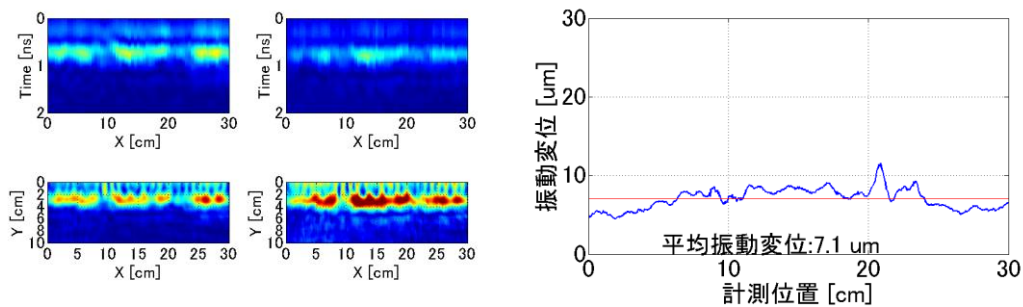


(b) R 側鉄筋

Fig. 6-11 上面加熱供試体計測 1 回目



(a) L 側鉄筋



(b) R 側鉄筋

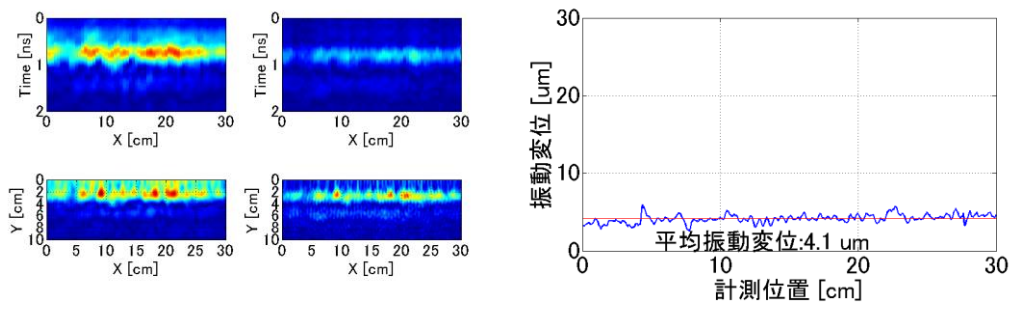
Fig. 6-12 上面加熱供試体計測 2 回目



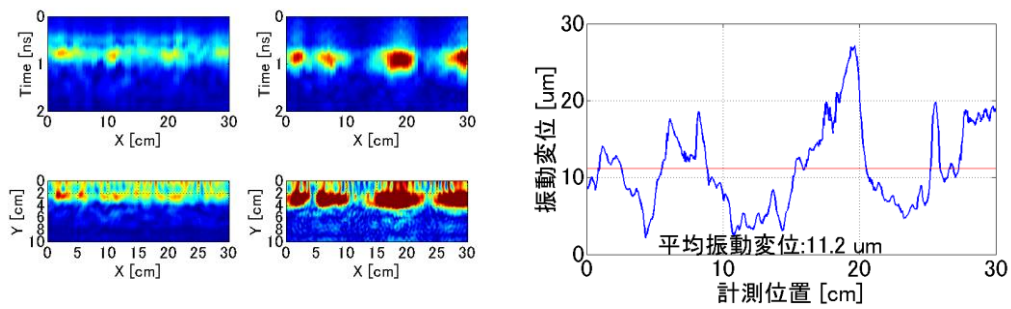
Fig. 6-13 上面加熱供試体計測面(1回目)



Fig. 6-14 上面加熱供試体計測面(2回目)

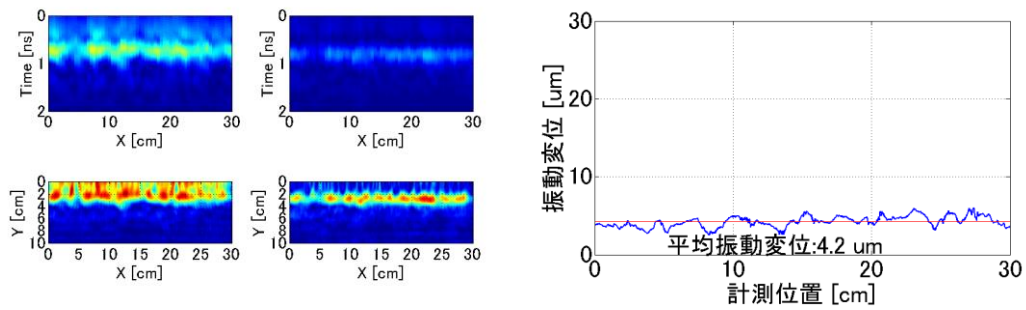


(a) L 側鉄筋

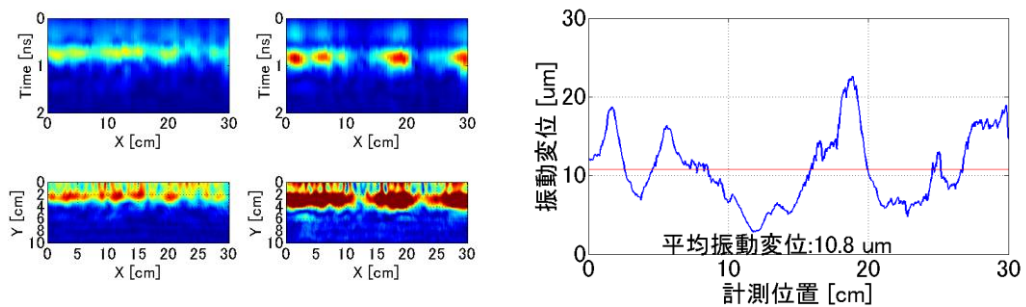


(b) R 側鉄筋

Fig. 6-15 下面加熱供試体計測 1 回目



(a) L 側鉄筋



(b) R 側鉄筋

Fig. 6-16 下面加熱供試体計測 2 回目



Fig. 6-17 下面加熱供試体供試体右側(1 回目)



Fig. 6-18 下面加熱供試体右側面(2 回目)

Fig. 6-3~Fig. 6-10 より、Control 供試体と塩水 Control 供試体では、左右の鉄筋の振動変位の上昇はみられず、計測範囲全てでおおよそ同じ値となった。2 回目の計測結果では、1 回目の計測結果と同様、Control 供試体には大きな振動変位の変化はみられず、供試体にひび割れも確認できなかった。しかし、振動変位の値が Control 供試体では若干小さく、塩水 Control 供試体では若干上昇する結果となった。これは、振動変位の性質によるものの可能性がある。

先行研究にて、振動変位の値は鉄筋とコンクリートの付着力に依存し、鉄筋の腐食初期段階において、鉄筋周囲にできた腐食生成物が周囲のコンクリートを圧迫することで、振動変位が小さくなることが示されている。これより、初期段階では、腐食の進行と共に振動変位は低下し、ある一定の腐食を境に振動変位が上昇していく。

以上より、Control 供試体の振動変位の減少は腐食が始まっている可能性があり、塩水 Control 供試体の振動変位の上昇は腐食の進行している可能性がある。

Fig. 6-11~Fig. 6-14 より、上面加熱供試体では、R 側鉄筋は Control 供試体と比較し、大きな振動変位の上昇はみられなかったが、L 側鉄筋の前半 150 mm 付近までにおいて局所的な振動変位の上昇がみられた。また、計測面である供試体上面において、L 側鉄筋の振動変位の上昇に概ね対応する位置にひび割れがみられた。2 回目の計測では、1 回目の計測にて振動変位が高かった部分に加え、180 mm 付近に新たに振動変位の局所的な上昇がみられた。また、この振動変位の上昇に対応するように供試体上面にもひび割れの進展が確認された。

Fig. 6-15~Fig. 6-18 より、下面加熱供試体では、L 側鉄筋の振動変位は Control 供試体と大差なく、局所的な振動変位の上昇もみられなかったが、R 側鉄筋では、計測範囲全体で複数個所振動変位が大きく上昇している結果が得られた。また、供試体右側面を確認したところ、鉄筋埋設位置に沿って、計測範囲全体に及びひび割れが入っていることが確認された。2 回目の計測では、計測開始位置から 50 mm 付近に、1 回目の計測では 12 μm 程度だった振動変位が 18 μm 程度への上昇がみられた。また、R 側側面のひび割れが振動変位の上昇した部分へわずかに進展したことが確認された。これに加え、測部位の中央付近にわずかに錆汁の流出が確認された。

6-4 供試体腐食評価

前項にて計測した供試体の内、塩水浸漬させた塩水 Control 供試体並びに、振動変位の最も局所的な変化が確認された上面加熱供試体を分割し、内部の腐食状況の確認を行った。分割した供試体は計測開始位置から 100 mm を含む長さ 200 mm の大きさに切断したものである。切断、分割の概要を Fig. 6-19 に示す。また、割った供試体をそれぞれ Fig. 6-20, Fig. 6-21 に示す。

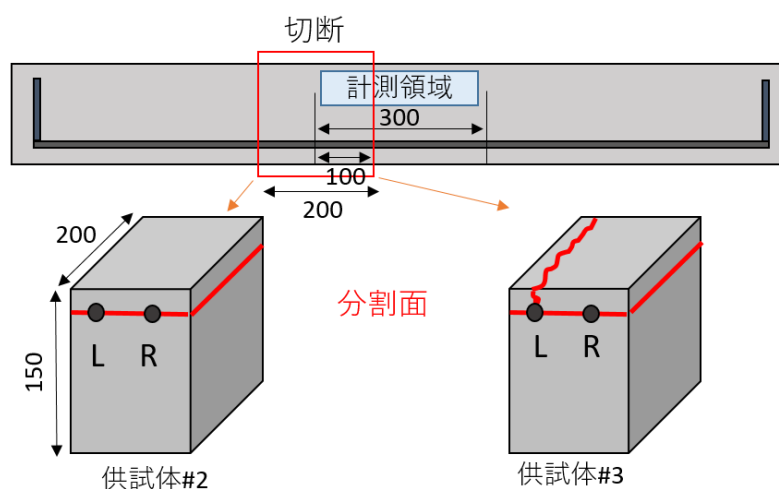


Fig. 6-19 供試体分割概要図



Fig. 6-20 塩水 Control 供試体



(a) 分割面



(b) 分割側面

Fig. 6-21 上面加熱供試体

Fig. 6-20 より，2 回目の計測でも振動変位の上昇がみられなかった塩水 Control 供試体では，鉄筋に腐食は全くみられなかった。

Fig. 6-21 より，1 回目 2 回目通して振動変位に大幅な上昇が確認されていた上面加熱供試体の L 側鉄筋は鉄筋全体に錆がみられた。R 側鉄筋においても腐食はみられたが，L 側鉄筋では供試体分割時に供試体から外れる程度に付着切れが進行していたことが確認された。また，振動変位の大幅な上昇が観られている 50 mm 付近に腐食生成物の塊があり，供試体にも鉄筋と直行する方向に割れ，強度が落ちていたことも確認された。一方で電食実験の時と同様，振動変位の上昇がみられない部分においても錆の生成が確認された。

7 章 振動変位の局所的な上昇の要因推定

5 章, 6 章より, 振動変位の局所的な上昇が確認された供試体では共通してコンクリート内外部でのひび割れと錆がみられた。一方, その局在性は数 cm のオーダーであり, その局在的な振動変位上昇がコンクリート中の腐食鉄筋のみの振動特性の空間変化によって起こるものとは考えにくい。したがって, この局在的な振動変位増加について腐食鉄筋以外の別の要因について考察する。

7-1 電食供試体における直交方向イメージング

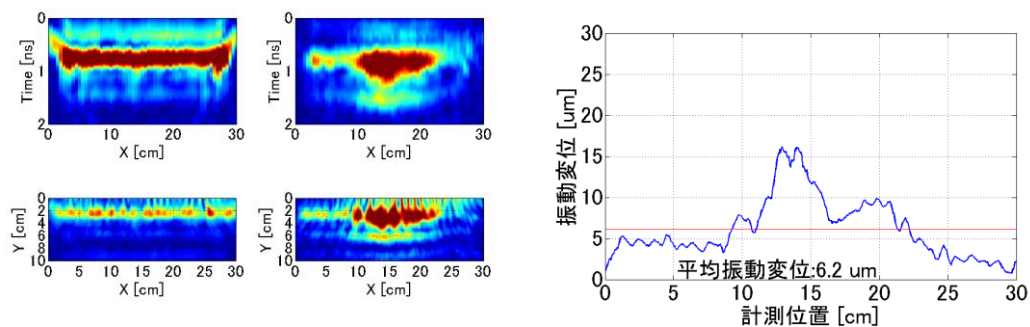
7-1-1 実験概要

5 章, 6 章より, 鉄筋振動変位の局所的な上昇の原因として, 鉄筋周囲に生じた磁性を持つ錆である黒錆と錆汁の 2 つが示唆された。黒錆は鉄筋の腐食と共に生成される物質であり, 錆汁は鉄筋の腐食部位から周囲のコンクリートへと浸透することで供試体のひび割れの原因物質であるため, 供試体中における存在場所が鉄筋周囲に生成される黒錆とは異なる。これより, 振動変位の上昇部分において鉄筋と直交方向に移動計測を行い, 鉄筋位置以外の反射波の有無を調べることで錆汁と黒錆の判別が可能である。

RC 供試体を 5 章と同様の方法で, 表面にひび割れが生じるまで電食を行った。使用した供試体は, W100×H100×D300, D16 鉄筋がかぶり 30 mm の位置に埋設されている供試体であり, 計測機構は第 4 章と同様のものを使用した。

7-1-2 実験結果

鉄筋長手方向へのスキャン結果並びに分割後の供試体を Fig. 7-1 に示す。



(a) 供試体スキャン結果

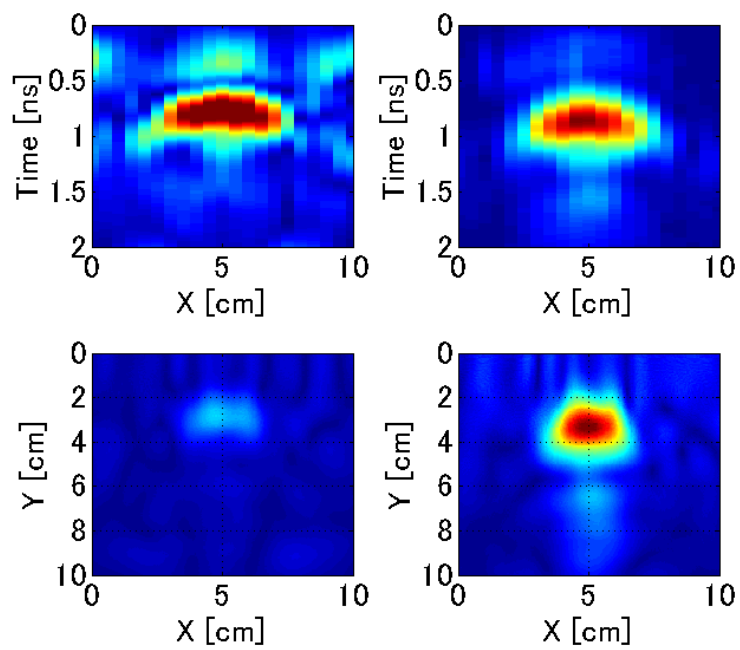


(b) 供試体分割断面

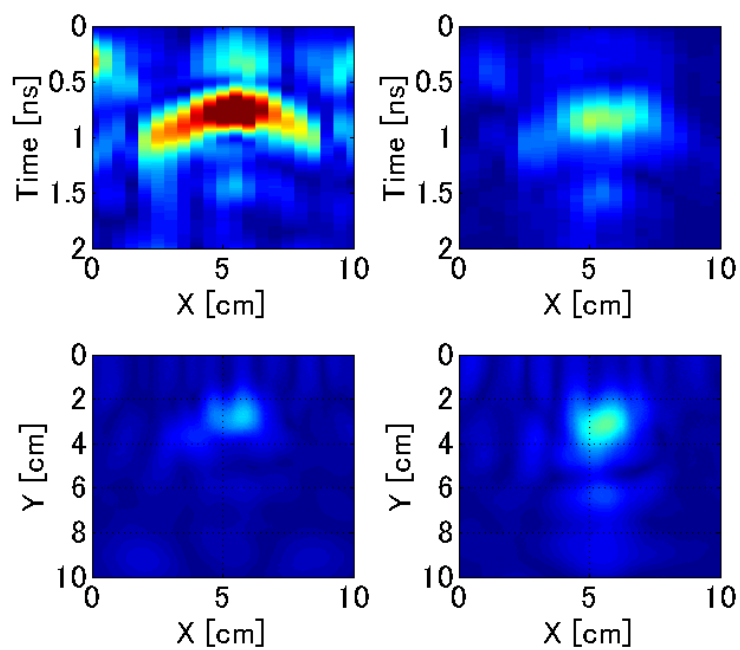
Fig. 7-1 腐食供試体

Fig. 7-1 より、鉄筋全体が腐食しており、錆汁が鉄筋上側に広がることで鉄筋直上にひび割れが生じたと思われる。振動変位は中央部 140 mm 付近で最大となっており、この値は、電食前の 4 倍程度の値である。また、励磁コイルが供試体から外れる両端 50 mm 付近まではドップラ成分が小さくなった。

また、振動変位の大幅な上昇がみられた 140 mm の位置と、振動変位の大幅な上昇がみられていない 100 mm の位置での鉄筋と直行する方向で移動計測を行った結果を Fig. 7-2 に示す。上 2 つが左から直流成分、ドップラ成分のレーダプロファイルであり、下 2 つがそれぞれを合成開口処理した結果となっている。



(a) 140mm



(b) 100mm

Fig. 7-2 鉄筋直交方向イメージング結果

Fig. 7-1 より、錆汁は供試体上面や側面への浸透が確認されており、錆汁が振動物体と仮定した際、鉄筋直交方向へ移動計測した場合において、鉄筋位置以外で大きなドップラ成分が得られるはずである。しかし、Fig. 7-2 では、ドップラ成分のレーダプロファイル、イメージング結果共に鉄筋かぶり位置である 3 cm 付近からのみ強い反射が確認され、周囲に鉄筋以外の大きな反射は確認されなかった。以上より、局所的な振動変位増加を与える振動物体は錆汁ではなく、鉄筋周囲に付着した黒錆である可能性が考えられる。

7-2 鉄筋腐食におけるコンクリート内部ひび割れや劣化

コンクリート中における鉄筋付近に生じる内部ひび割れは、鉄筋の腐食生成物による膨張圧が原因の 1 つである。そこで腐食生成物の体積膨張率を、式(7-1)を用いて算出する。

$$\gamma = \frac{\rho_{Fe} \cdot \sum u_i n_i}{u_{Fe} \cdot n_{Fe} \cdot \rho} \quad (7-1)$$

この時、 γ ：腐食生成物の体積膨張率、 ρ ：腐食生成物の密度(g/cm^3)、 n_i ：腐食生成物の分子一個に含まれる Fe, O, H 等の各原子の数、 u_i ：Fe, O, H 等の各原子量、 ρ_{Fe} ：Fe の密度(g/cm^3)とする。

5 章でも述べたが、腐食生成物は発生環境により生じる物質や存在比が異なるため、代表的なものの算出を行った。算出した体積膨張率を Table 7-1 に示す。また、腐食生成物の密度に関しては不明瞭な点が多く、算出結果は 1 例である。

Table 7-1 体積膨張率

腐食生成物	密度(mg/cm^3)	体積膨張率
$\alpha - \text{FeOOH}$	4.3	2.9
$\beta - \text{FeOOH}$	3.6	3.5
$\gamma - \text{FeOOH}$	4.1	3.1
Fe_3O_4	5.2	2.1
CaFeO_2Cl	3.4	6.9

腐食の初期段階において生じる物質は主に、 $\alpha - \text{FeOOH}$ と Fe_3O_4 の 2 種類であり、生成比が同程度と仮定すると、体積膨張率はおおよそ 2.5 倍程度である。また、その他腐食生成物は基本的に膨張圧が高く、実際の腐食生成物はより大きい体積膨張率をもっている可能性がある。これより、腐食による鉄筋の欠損部位付近では膨張圧が高く、内部ひび割れが起こりやすい環境であると考えられる。

鉄筋コンクリートでは、腐食生成物の生成と共に上昇する膨張圧がコンクリートの引張強度を超えた際に内部ひび割れが生じるが、ひび割れよち先、もしくは同時に鉄筋とコンク

リートの付着切れも生じている。しかし、シミュレーションにおいて付着切れの模擬が難しく、既出の研究では付着が完全なものとしてひび割れ進展のシミュレーションを行っている。腐食が完全な状態とした場合におけるひび割れ発生の簡単な流れを Fig.8-3 に示す。ひび割れ進展は腐食位置から放射状に膨張圧による応力が生じ、微小なひび割れが鉄筋周囲に発生する。腐食量の増加に伴い微小ひび割れが連結し、大きなひび割れになり、以後生じたひび割れが成長していき、浅部において表面に到達し、表面ひび割れが顕在化する。

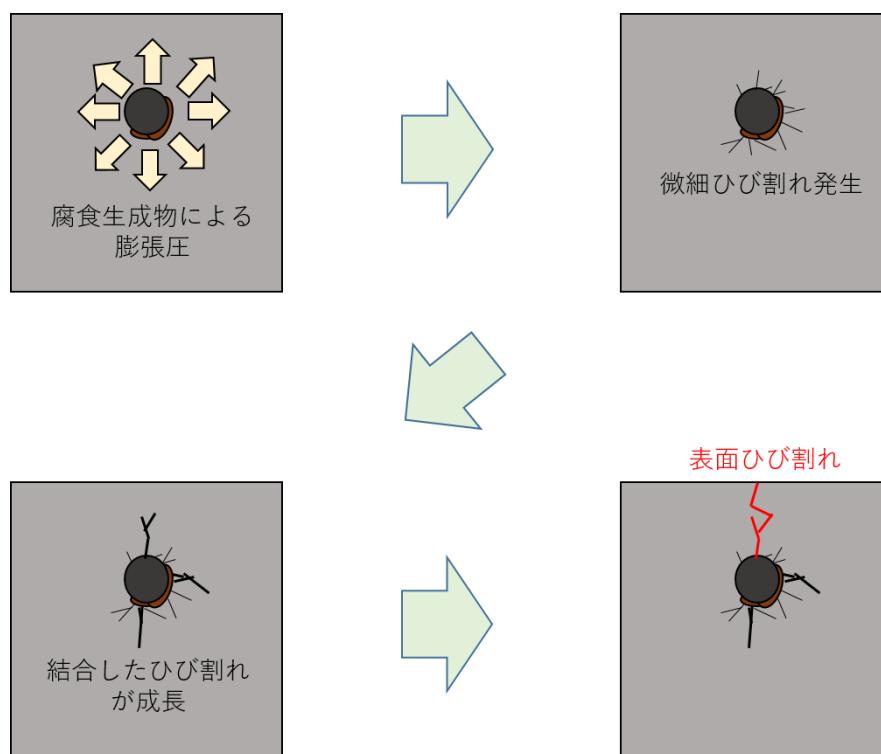


Fig. 7-3 ひび割れ進展概要

Fig. 7-3 より、鉄筋の腐食量が多く、腐食生成物が多いと思われる部分においては、鉄筋周囲に内部ひび割れが起きている可能性が高く、腐食生成物や鉄筋に対する拘束力が弱まっていると考えられる。

また、コンクリートの劣化の一種としてブリーディングと呼ばれる現象が存在する。

ブリーディングとは、JIS A 0203 にて、フレッシュコンクリート及びフレッシュモルタルにおいて固体材料の沈殿又は分離によって練り混ぜ水の一部が遊離して上昇する現象と定義されており、水分を多く含むコンクリートにおいて、粗骨材等の重量物が下部に沈下するものである。このブリーディングの量が多い場合、鉄筋周囲の付着力の低下や、下面に滞留した水により鉄筋下面に空隙の発生を招き、コンクリートとしての強度が低下する。

今回使用した供試体は、W/C63%であり、打設時の水分が多いものである。したがってブリーディングによる鉄筋の付着力の低下や空隙が生じていた場合、これらの空隙にて腐食生成物が成長し、ひび割れの発生地点になった可能性も考えられる。

7-3 振動変位の局所的上昇のメカニズム考察

前項にて，鉄筋の腐食生成物生成部位において鉄筋周囲にひび割れが存在することに加え，供試体中に存在する空隙からひび割れが進展する可能性を示した．また，前章より，振動物体として腐食生成物の1つである Fe_3O_4 が振動物体である可能性を示唆した．以上より考えられる振動変位の局所的増加のメカニズムに対する仮説を以下に示す．

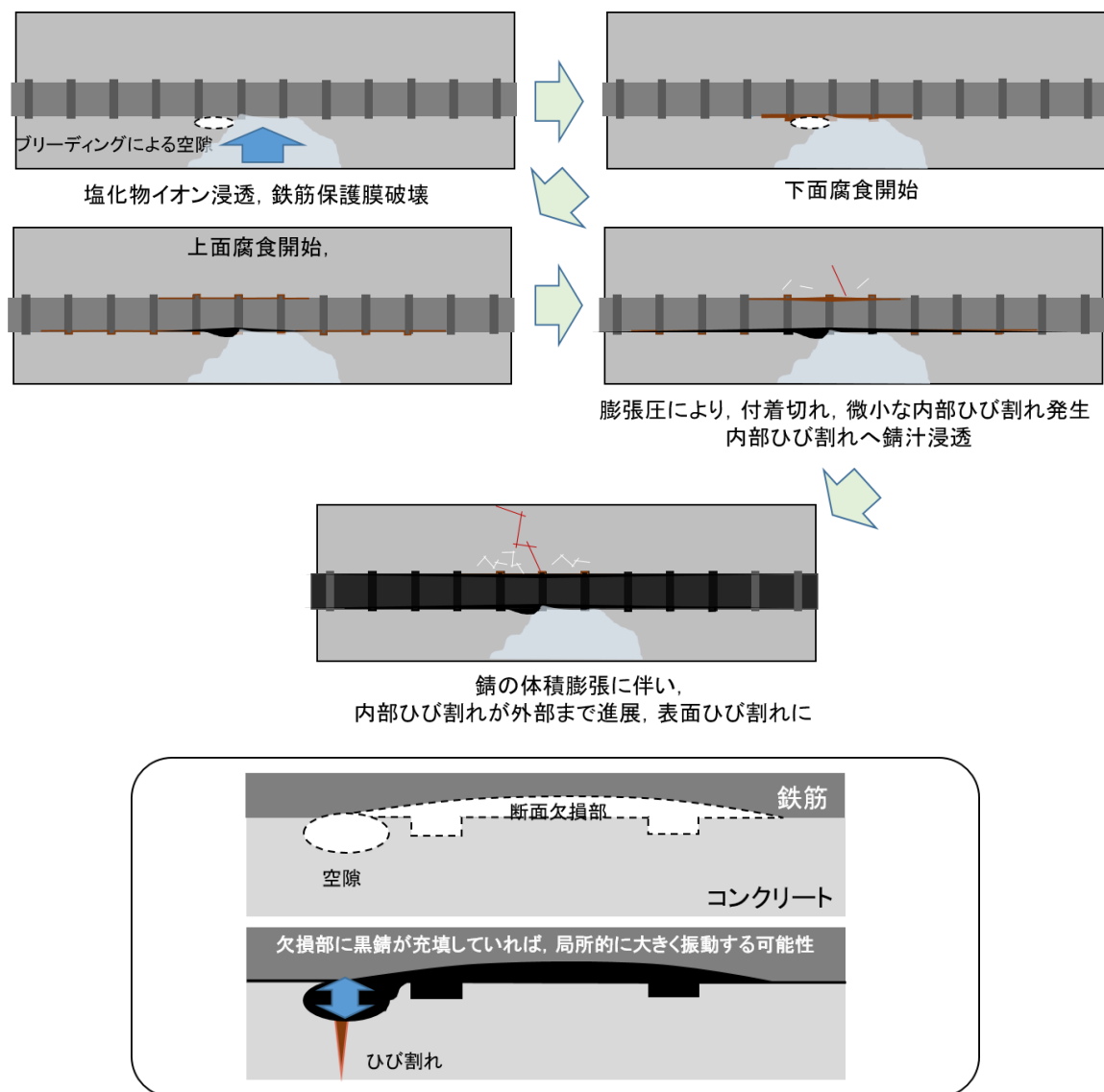


Fig. 7-4 振動変位の局所的増加メカニズム

塩化物イオンが浸透し、鉄筋に接触することで鉄筋表面の不導体被膜が破壊され、鉄筋の腐食が始まる。コンクリート内部は強アルカリ環境であることに加え、低酸素状態であるため、酸化速度が遅く、黒錆(Fe_3O_4)が多く生成される。腐食生成物は鉄筋の 2.5 倍程度の体積膨張率を持つため、腐食部分付近にブリーディングによる付着力低下や空隙が存在する場合、膨張圧により腐食生成物が充填され、優先してその部位で腐食生成物が成長する。腐食生成物の成長に伴い、周囲のコンクリートに微細なひび割れが生じ、生じた微小ひび割れが連結し大きなひび割れとなって成長する。このように生じたコンクリートの欠損部位に存在する黒錆が励磁コイルによる加振により、鉄筋の振動よりも大きな振動をすることで振動変位の局所的な上昇につながった可能性が考えられる。

8 章 結論

8-1 結論

本研究では、先行研究の加振レーダ法に代わる新たな計測手法として加振パルスレーダ法を開発し、既往のシステムとの比較を行った。また、加振パルスレーダシステムの高速度性を利用し、イメージングによる RC 供試体のスキャンを行い、振動変位に局所的な上昇を確認した。以下に各章にて得られた結果を述べる。

1 章は序論であり、現在主流で行われている RC 構造物の検査方法、並びに加振レーダ法について述べると同時に、それらの欠点について指摘した。

2 章では、加振レーダ法、位相補正並びにマイグレーションの原理について述べた。

3 章では、製作した加振パルスレーダシステムの詳細や計測方法、使用機器について述べた。

4 章では、開発した加振パルスドップラレーダの性能評価として、共通の供試体、計測機構を用いて既往のシステムとの比較実験並びにシステムの評価を行った。比較の結果、既往のシステムでは 120 秒かかっていた計測を新規システムでは同一の SN 比に換算して、従来システムに比べ 480 倍高速に計測が可能であることを示した。また、計測システムのノイズフロアが送信パルスのジッターに依存することを示し、これが白色雑音の性質を持つことから、計測時間を長くすることにより、時間の平方根に比例して SN 比を向上可能であることも示した。

5 章では、電食試験に伴う鉄筋振動変位の空間分布の経過確認のため、4 章にて示した加振パルスレーダシステムの高速度性を利用し、多点の計測を必要とするイメージングを用いて、鉄筋に沿ったスキャンを行った結果を述べた。移動計測の結果、振動変位が数 cm のオーダーで局所的に数倍に上昇することがわかった。また、その局所的な振動変位上昇部位の付近で腐食に伴う鉄筋の断面欠損がみられ、振動変位の空間分布計測による鉄筋の劣化部位推定の可能性を示した。

さらに、このことから、鉄筋の振動変位計測において、鉄筋上の 1 点の計測では局所的な劣化を見逃す可能性があり、移動計測でのイメージングの必要性についても示唆された。また、振動変位の上昇部位に錆汁と磁性を持つ黒錆が確認された。

6 章では、電食実験との比較を目的とし、塩水浸漬と屋外暴露を数か月の期間で繰り返すことで自然の腐食を模擬した供試体にて移動計測による同様の振動変位計測を行った。この結果、腐食の進行に伴い、表面にひび割れが生じた部分に対応して振動変位が局所的に上昇する結果が得られた。供試体を割り、鉄筋を取り出して確認したところ、振動変位が局所的に上昇している供試体において鉄筋腐食がみられた。

7 章では、まず振動変位の局所的な上昇の原因となる振動物体の推定として、表面にひび割れが生じるまで電食した供試体を鉄筋と直交する方向へ移動計測を行うことで、ドップラ成分の分布計測を行った。この結果、振動物体は鉄筋位置にのみ確認され、錆汁のようなコンクリート周囲へ広がっているものの反射は確認されなかった。これより、振動変位の上昇部位に確認されていた錆汁は振動物体ではなく、磁性を持つ黒錆が振動物体である可能性が示唆された。

また、振動変位に局所的な上昇がみられた供試体の共通点であるひび割れに着目し、腐食生成物によるコンクリートの内部ひび割れの発生メカニズムについて示した。また、鉄筋振動変位の局所的な上昇の要因の仮説として、ブリーディングによるコンクリート内部の空隙や、腐食進展に伴って生じる内部ひび割れによる欠損部位に存在する黒錆が振動している可能性を示唆した。

8-2 今後の課題

本研究では既往の加振レーダシステムに代わり、より高速で計測可能な加振パルスレーダの開発を行った。また、移動計測によるイメージングにより、振動変位が局所的に上昇することを確認し、その要因推定を行った。これらにより生じた課題を以下に示す。

(1) 振動変位上昇のメカニズム解明

本論文では、腐食供試体を鉄筋長手方向と直交方向に移動計測、合成開口処理を行った。この結果より、鉄筋の腐食位置付近にて数 cm オーダーの範囲で振動変位が局所的に上昇することが確認された。この要因として、本報告では磁性を持った腐食生成物である黒錆と内部ひび割れによるものである可能性を示唆した。しかし、コンクリートの内部ひび割れの進展や、腐食生成物の成分等明確に解明されていないものが多く、仮説の域を出ない。したがって、ひび割れと振動変位の関係性についてのシミュレーションを行うこと、微小な空間を模擬した供試体を作成し、磁性流体を流し込むことで空隙中の黒錆を模擬して振動変位計測を行うことの 2 点により、仮説の妥当性検証をする必要がある。

(2) 新規計測機構の製作

今後の展望として、実際の橋梁の鉄筋振動変位計測を行う予定であるが、現状の励磁コイル、電源ではかぶり 60 mm 程度までしか計測できず、100 mm を超える橋梁の鉄筋を計測することができない。より深いかぶりの鉄筋を計測する方法の 1 つとして加振力の増強が挙げられる。中でも簡易的な方法として励磁コイルの巻き数を増やす方法があるが、巻き数の増加に伴い、励磁コイルの重量も増加するためより強固な計測治具も要求される。したがって、計測機構全体の改良が必要である。

参考文献

- (1) 三輪空司：加振レーダ法による構造物内の非破壊鋼材腐食評価，*計測と制御*, vol.58, no.11, pp.843-847 (2019)
- (2) 三輪空司, 高橋一徳, 松井隼平：加振パルスドップラレーダによる RC 構造物内鉄筋振動変位計測，*コンクリート工学年次論文集*, vol.41, no.1, pp.1781-1786 (2019)
- (3) 三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳：励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング，*コンクリート工学年次論文集*, vol.38, no.1, pp. 2073-2078 (2016)
- (4) 松井隼平：加振レーダ法における鉄筋振動変位の加振周波数依存性に関する研究，*令和元年度修士論文*
- (5) 高谷哲, 西澤彩, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章：コンクリート中における鉄筋腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，*土木学会論文集 E2*, Vol.71, No3, pp235-247 (2015)
- (6) 戸田勝哉, 上野敦, 宇治公隆：ひび割れ発生時におけるコンクリート中の鉄筋腐食量に関する研究，*コンクリート工学論文集*, Vol21, No.3, pp. 31-41 (2010)
- (7) 三沢俊平：環境と腐食，*防錆防食講座*, 第 2 講, pp. 309-319 (1981)

謝辞

本研究を行うにあたり基礎から応用にわたる丁寧なご指導、ご協力を賜りました群馬大学大学院理工学府電子情報部門、三輪 空司 准教授に心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、群馬大学大学院理工学府電子情報部門 本島 邦行 教授、同境創生部門 小澤 満津雄 准教授から懇切丁寧なご指導、ご協力を賜りました。深く感謝申し上げます。

本研究を進める上で、供試体の計測並びに各種試験にご協力いただきました群馬大学大学院理工学府環境創生部門 小澤 満津雄 准教授、阿久津 裕亮 氏に心より感謝申し上げます。

研究業績

査読付き論文

三輪空司，松井隼平，中村和弘，“加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性”，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 1, pp. 1588-1593 (2020).

口頭発表

1. 中村和弘，三輪空司，高根沢彰兵，小松桂太，”鉄筋振動変位計測のための加振パルスドップラレーダの開発”，第10回電気学会栃木・群馬支所合同研究発表会，2020年3月5日，群馬高専（講演中止）
2. 中村和弘，三輪空司，”加振パルスドップラレーダによるコンクリートの鉄筋振動変位イメージング”，第37回センシングフォーラム，2020年9月4日，高知工科大学（オンライン開催）

付録

爆轟供試体計測

本項では, より劣化の激しい RC 供試体の振動変位計測の例として, 爆轟を行い塩水浸漬, 屋外暴露を行った供試体の振動変位計測の結果について述べる.

計測を行った供試体の寸法を Fig. 10-1, 概要を Table 10-1 に示す.

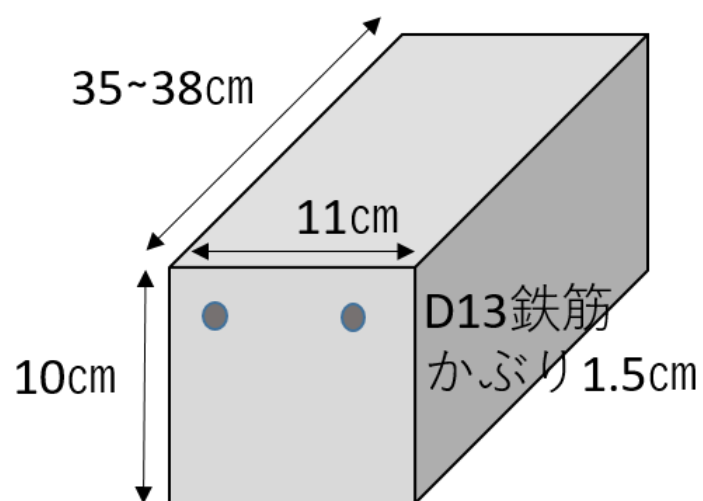


Fig. 10-1 供試体寸法

Table 10-1 供試体概要

試験体 No.	加熱	衝撃	HPFRCC	塩水	屋外曝露
6-1	/	/	/	/	/
6-4	500°C	/	/	○	○
1-5	500°C	○(軽)	○		
4-1	300°C	○(軽)	/		
4-2	500°C	○	○		
4-3	/	○	○		
4-4	500°C	○	/		
4-5	/	○	/		

Table 10-1 より, 6-1 供試体が Control 供試体であり, 何も処理を行っていないものであり, 6-1 供試体を除く他の供試体は加熱や爆薬による衝撃を与えて破壊した後塩水浸漬と屋外暴

露を行ったものである。

HPFRCC とは、高性能繊維補強セメント複合材料を指し、劣化した供試体周囲を補強したものとなる。(Fig. 10-2)

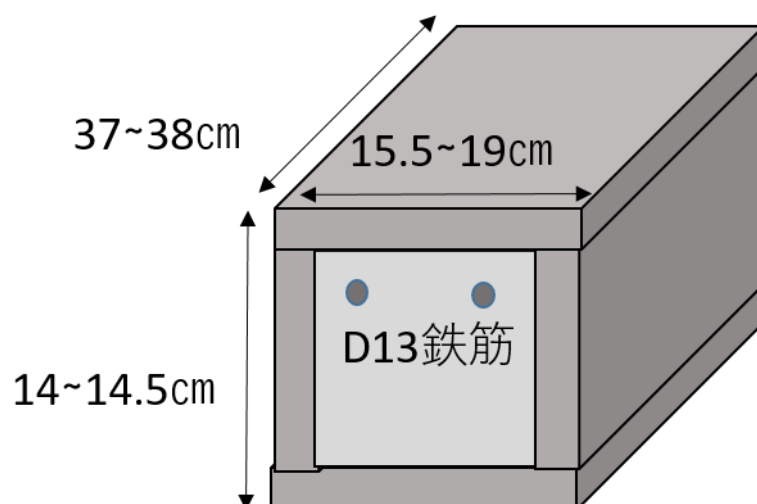


Fig. 10-2 HPFRCC 供試体

使用した計測機構は5章、6章と同様のものを使用した。また、励磁コイルへの印加電流は9Aとし、計測範囲は供試体中央部300mmとした。計測結果を以下に示す。

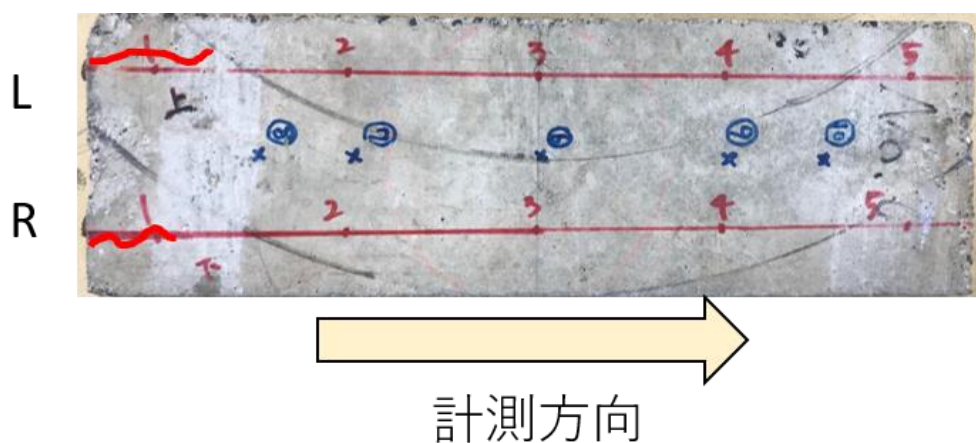
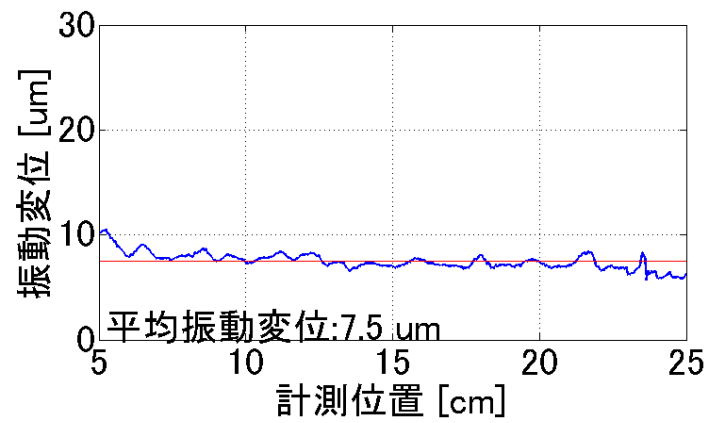


Fig. 10-3 6-1 供試体計測面



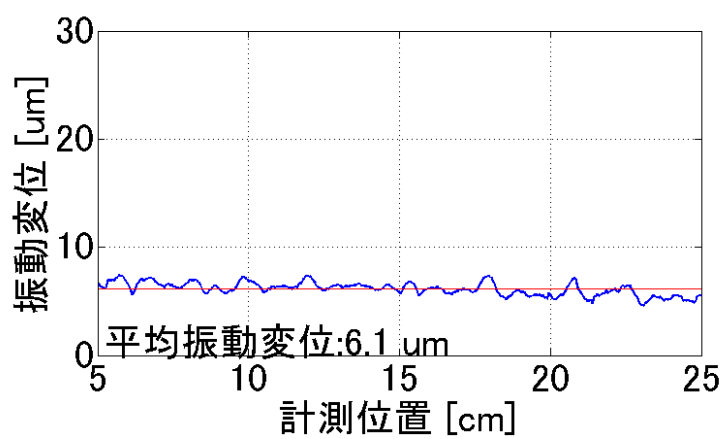
(a) 6-1 供試体 R 側側面



(b) 6-1 供試体 R 側振動変位

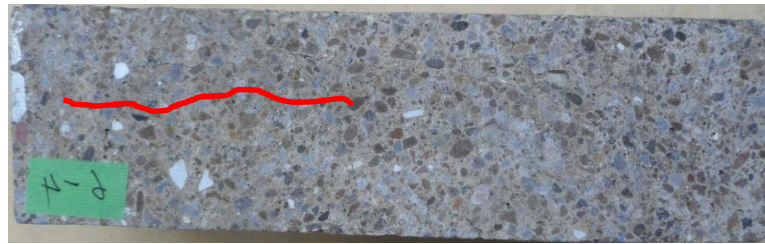


(c) 6-1 供試体 L 側側面

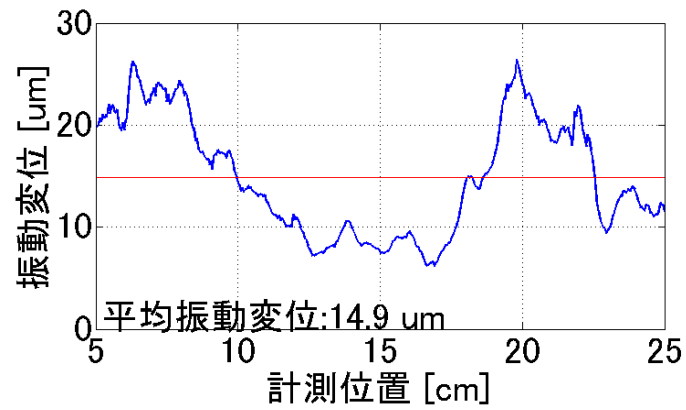


(d) 6-1 供試体 L 側振動変位

Fig. 10-4 6-1 供試体計測結果



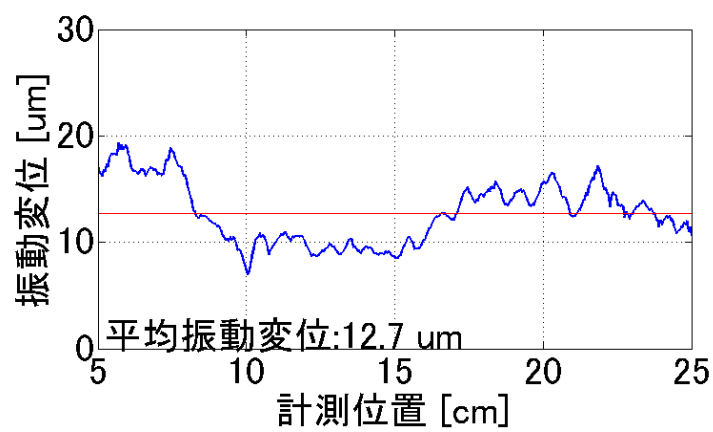
(a) 6-4 供試体 R 側側面



(b) 6-4 供試体 R 側

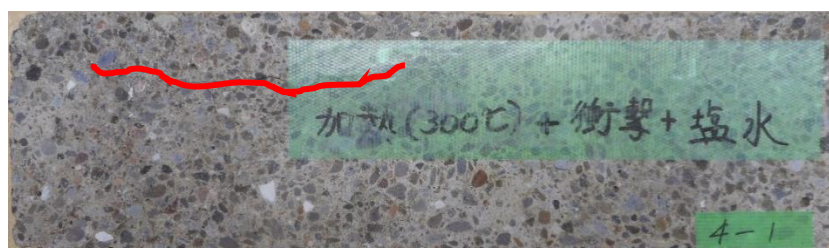


(c) 6-4 供試体 L 側側面

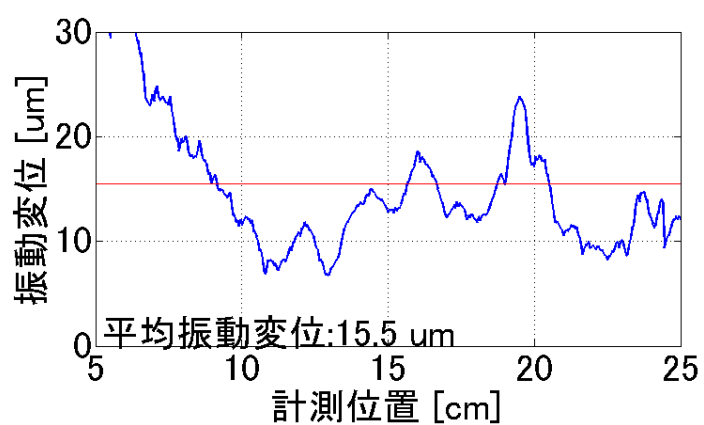


(d) 6-4 供試体 L 側

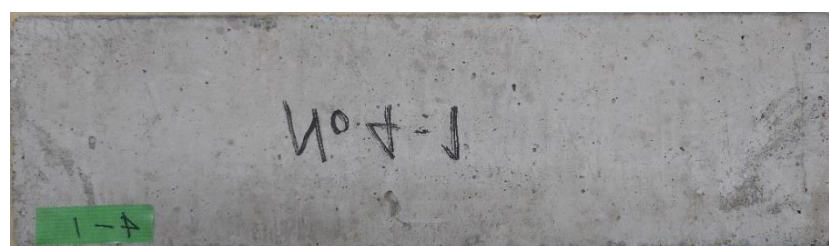
Fig. 10-5 6-4 供試体計測結果



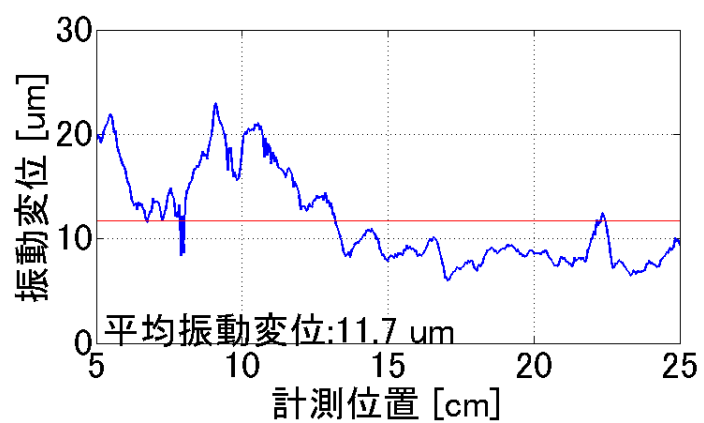
(a) 4-1 供試體 R 側側面



(b) 4-1 供試體 R 側



(c) 6-4 供試體 L 側側面

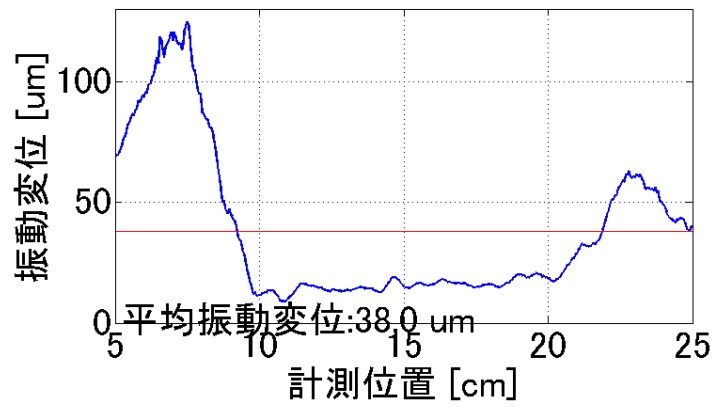


(d) 4-1 供試體 L 側

Fig. 10-6 4-1 供試體計測結果



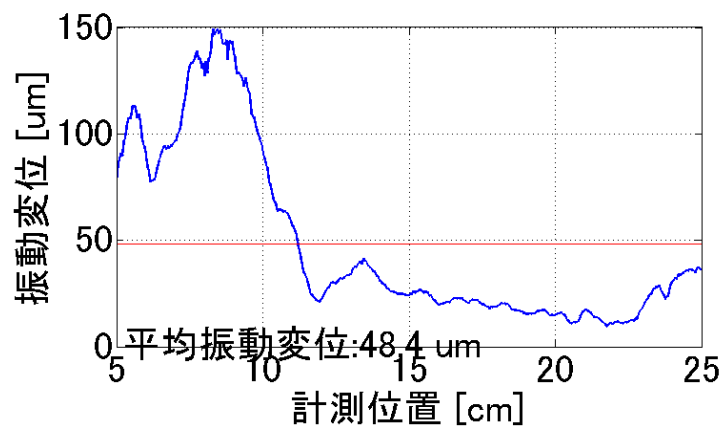
(a) 4-4 供試体 R 側側面



(b) 4-4 供試体 R 側

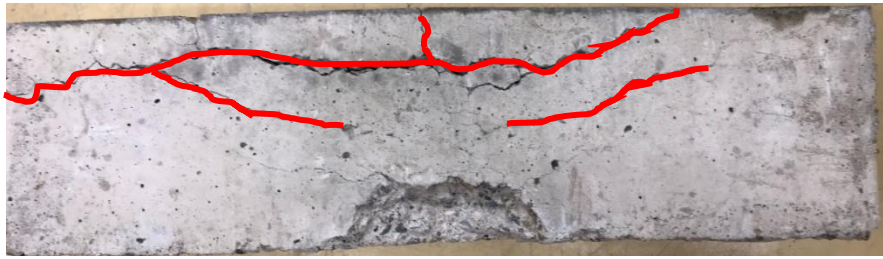


(c) 4-4 供試体 L 側側面

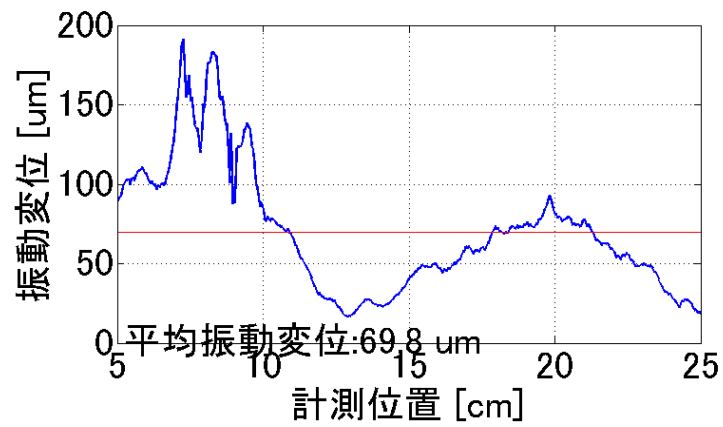


(d) 4-4 供試体 L 側

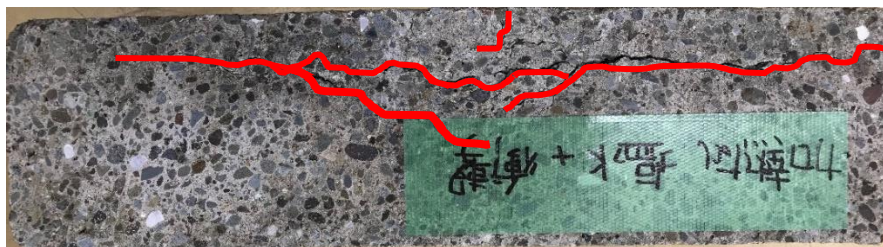
Fig. 10-7 4-4 供試体計測結果



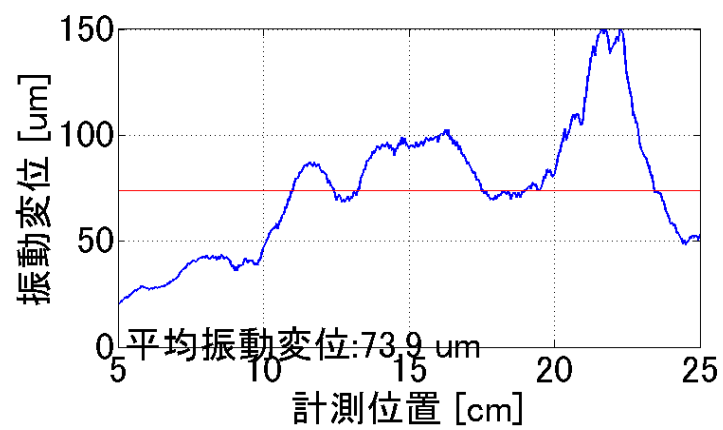
(a) 4-5 供試体 R 側側面



(b) 4-5 供試体 R 側



(c) 4-5 供試体 L 側側面

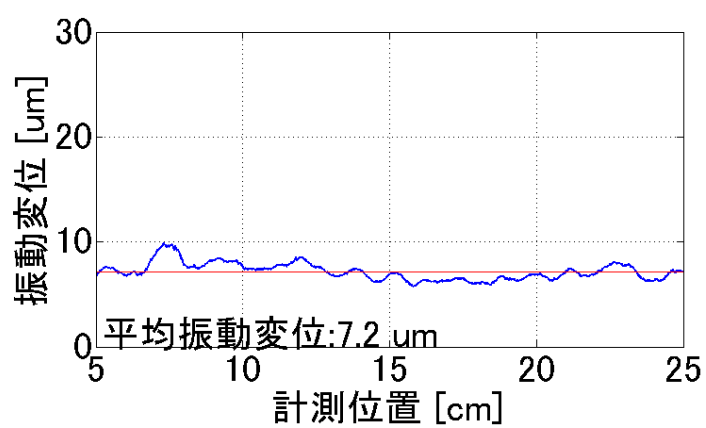


(d) 4-5 供試体 L 側

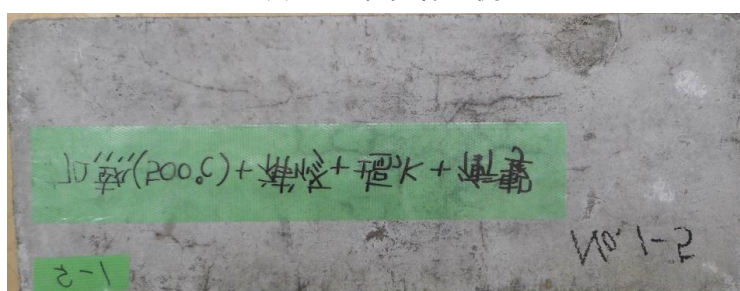
Fig. 10-8 4-5 供試体計測結果



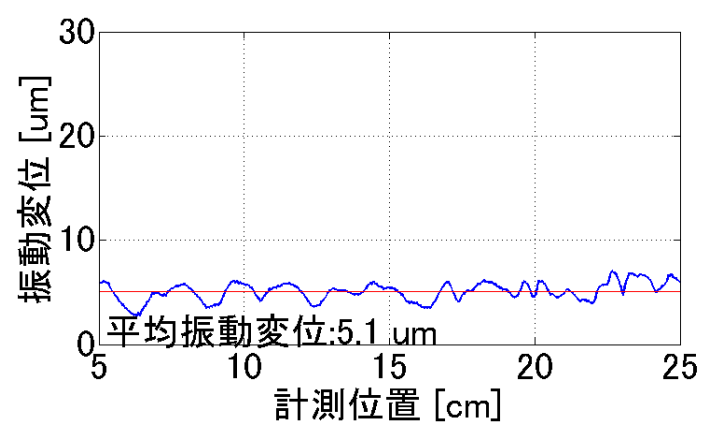
(a) 1-5 供試体 R 側側面



(b) 1-5 供試体 R 側



(c) 1-5 供試体 L 側側面

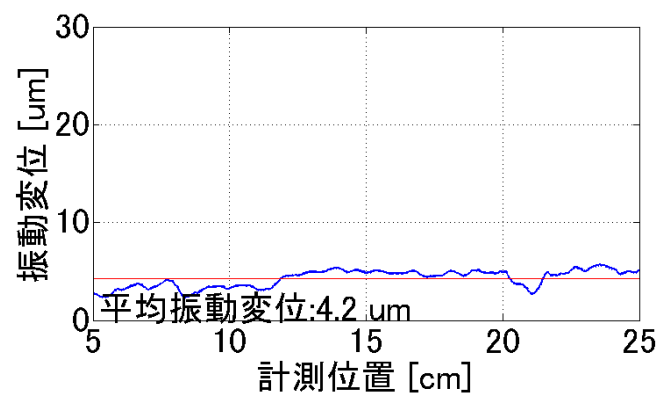


(d) 1-5 供試体 L 側

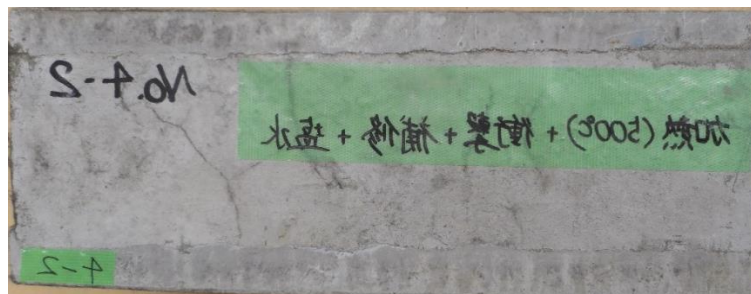
Fig. 10-9 1-5 供試体計測結果



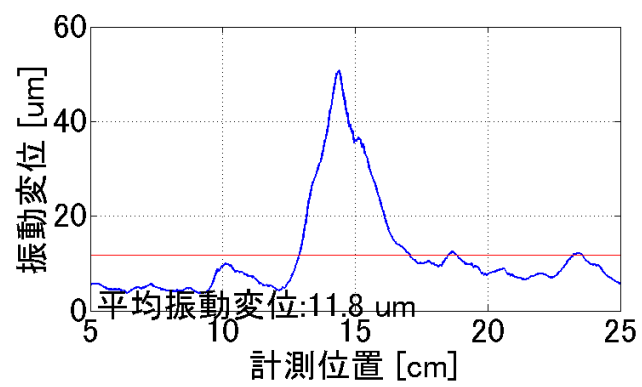
(a) 4-2 供試体 R 側側面



(b) 4-2 供試体 R 側



(c) 4-2 供試体 L 側側面

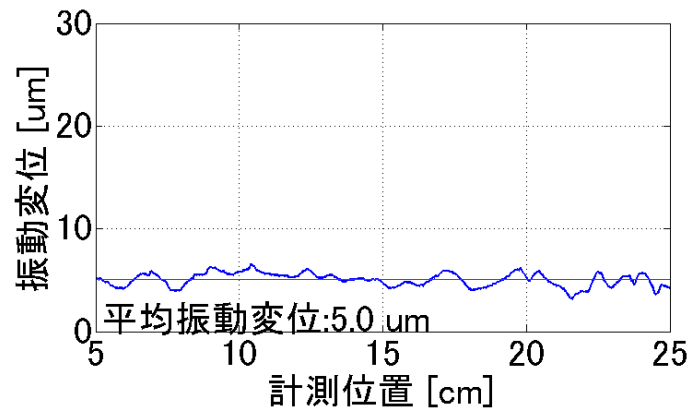


(d) 4-2 供試体 L 側

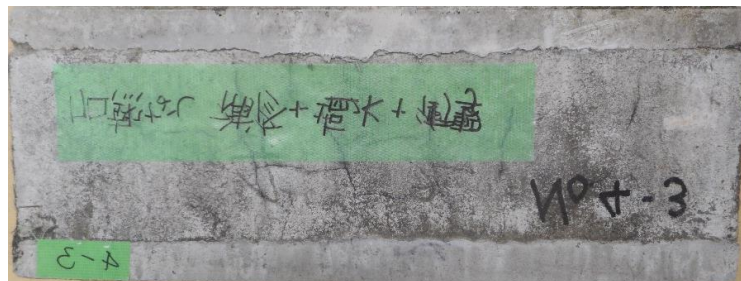
Fig. 10-10 4-2 供試体計測結果



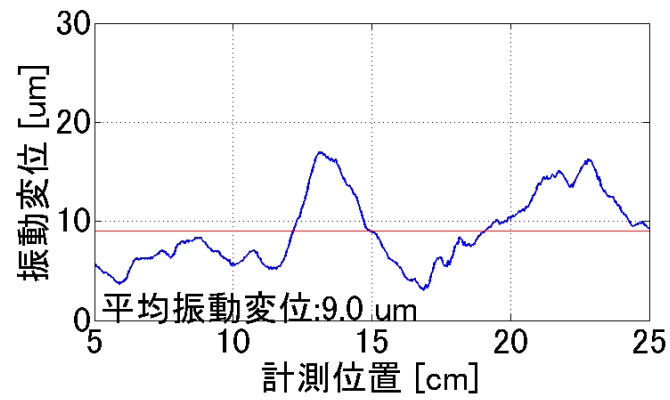
(a) 4-3 供試体 R 側側面



(b) 4-3 供試体 R 側



(c) 4-3 供試体 L 側側面



(d) 4-3 供試体 L 側

Fig. 10-11 4-3 供試体計測結果

Fig. 10-4 より，Control 供試体である 6-1 供試体では，5 章 6 章での供試体計測と同様に振動変位はほぼ変化しないことが確認された。

Fig. 10-5, Fig. 10-6 より，加熱，塩水浸漬，屋外暴露，軽度の衝撃を行った供試体である 6-4 では部分的に振動変位の上昇が確認された。6 章でも見られたが，振動変位が上昇している部分，もしくはその付近において，供試体側面にひび割れが確認された。

Fig. 10-7, Fig. 10-8 より，加熱，塩水浸漬，屋外暴露，大規模の衝撃を行った供試体である 4-4 では，供試体が複数に分散されるようなひび割れが生じており，振動変位が $100\text{ }\mu\text{m}$ を超える非常に大きい値が確認された。この原因として，内部の付着が完全にきれ，鉄筋とコンクリートに大きな空隙が生じていることが考えられる。また，Fig. 10-5, Fig. 10-6 とは異なり，表面に出るひび割れと振動変位の上昇部位の対応はとれなかった。

Fig. 10-9~Fig. 10-11 より，衝撃が軽度である 1-5 の供試体では，振動変位に大きな変化はみられないことに加え，補強によるかぶり増加に伴い，振動変位も全体的に低下している。4-2, 4-3 供試体では，R 側鉄筋では 1-5 同様大きな変化はみられなかったが，L 側の供試体中央部において動変位が 4-2 では $50\text{ }\mu\text{m}$ 程度，4-3 では 18 mm 程度まで増加していることが確認された。

また，補強無しの供試体の内，最も大きな振動変位が得られた 4-5 供試体の一部を破壊し，内部の鉄筋の状態の確認を行ったものを Fig. 10-12 に示す。



Fig. 10-12 4-5 供試体鉄筋腐食状況

Fig. 10-12 より，L 側鉄筋より R 側鉄筋の方が，腐食が進行しており，振動変位の上昇箇所において黒錆のような腐食生成物の塊が確認された。

より深いかぶりにおける計測

本論文では、かぶり 3cm の供試体を中心に計測を行ったが、本項ではより深いかぶりの計測を行った結果について述べる。

かぶり 5.5cm の供試体並びに 7cm の供試体の中央部において加振計測を行った。計測に使用した供試体を Fig. 10-13, Fig. 10-14 に示す。

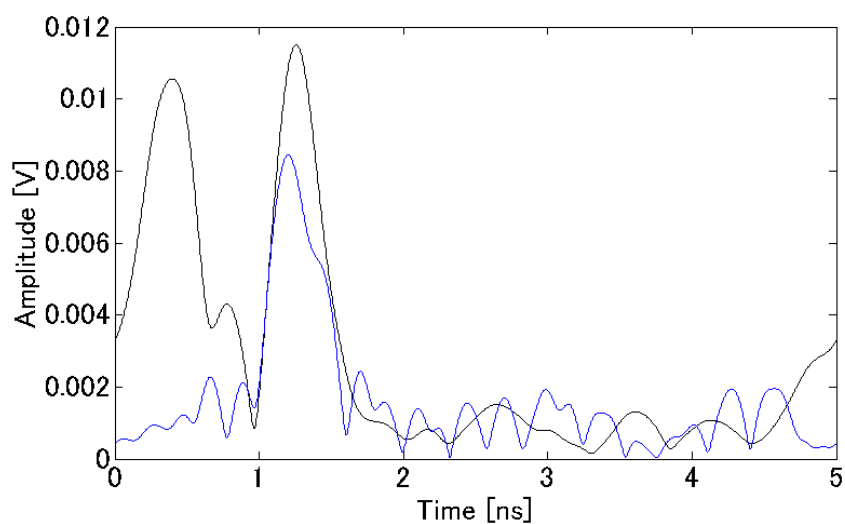


Fig. 10-13 かぶり 5.5cm 供試体

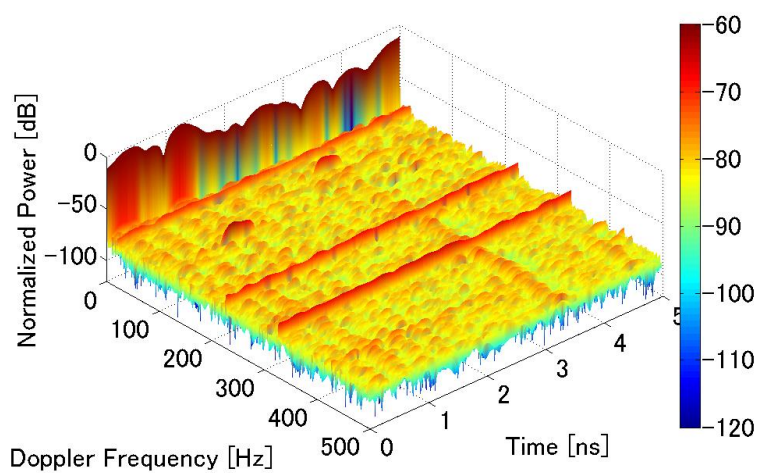


Fig. 10-14 かぶり 7 cm 供試体

計測条件は第5章、6章と同様、周波数差 1kHz、125kHz サンプリング、計測時間 1 秒とした。加振周波数は 53Hz、印加電流は 10A とした。計測結果を Fig. 10-15, Fig. 10-16 に示す。



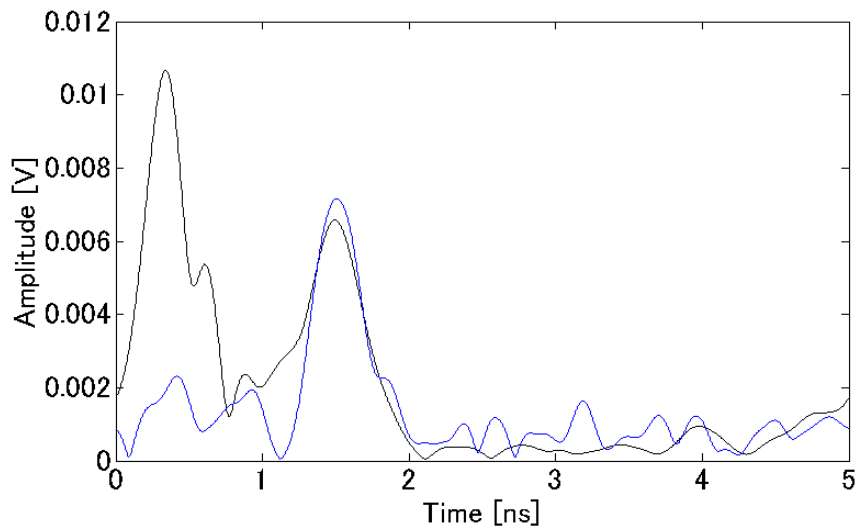
(a) 取得波形



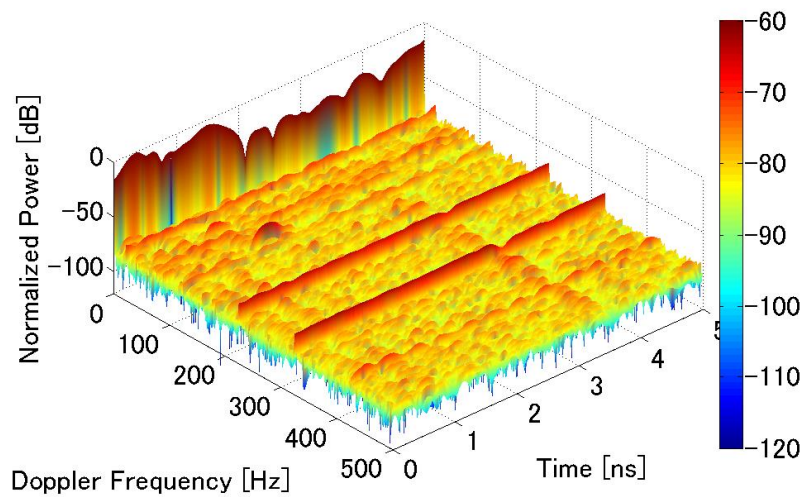
(b) スペクトル

Fig. 10-14 かぶり 5.5 cm D13 鉄筋計測結果

Fig. 10-14 より、10 A の加振計測において計測時間 1 秒の条件でかぶり 5.5 cm の位置に埋設されている鉄筋のドップラ成分を確認することができた。



(a) 取得波形



(b) スペクトル

Fig. 10-16 かぶり 7cmD16 鉄筋計測結果

Fig. 10-16 より，かぶり 5.5cm 時よりドップラ成分は小さくなったが，かぶり 7cm の位置においても鉄筋反射を確認できた。

尚，ドップラ成分がかぶり 5.5cm の時と変わらないが，これは鉄筋径の差によるものと思われる。

以上よりかぶり 7cm 程度であれば現状のパルスドップラレーダシステムで高速に計測可能であると考えられる。